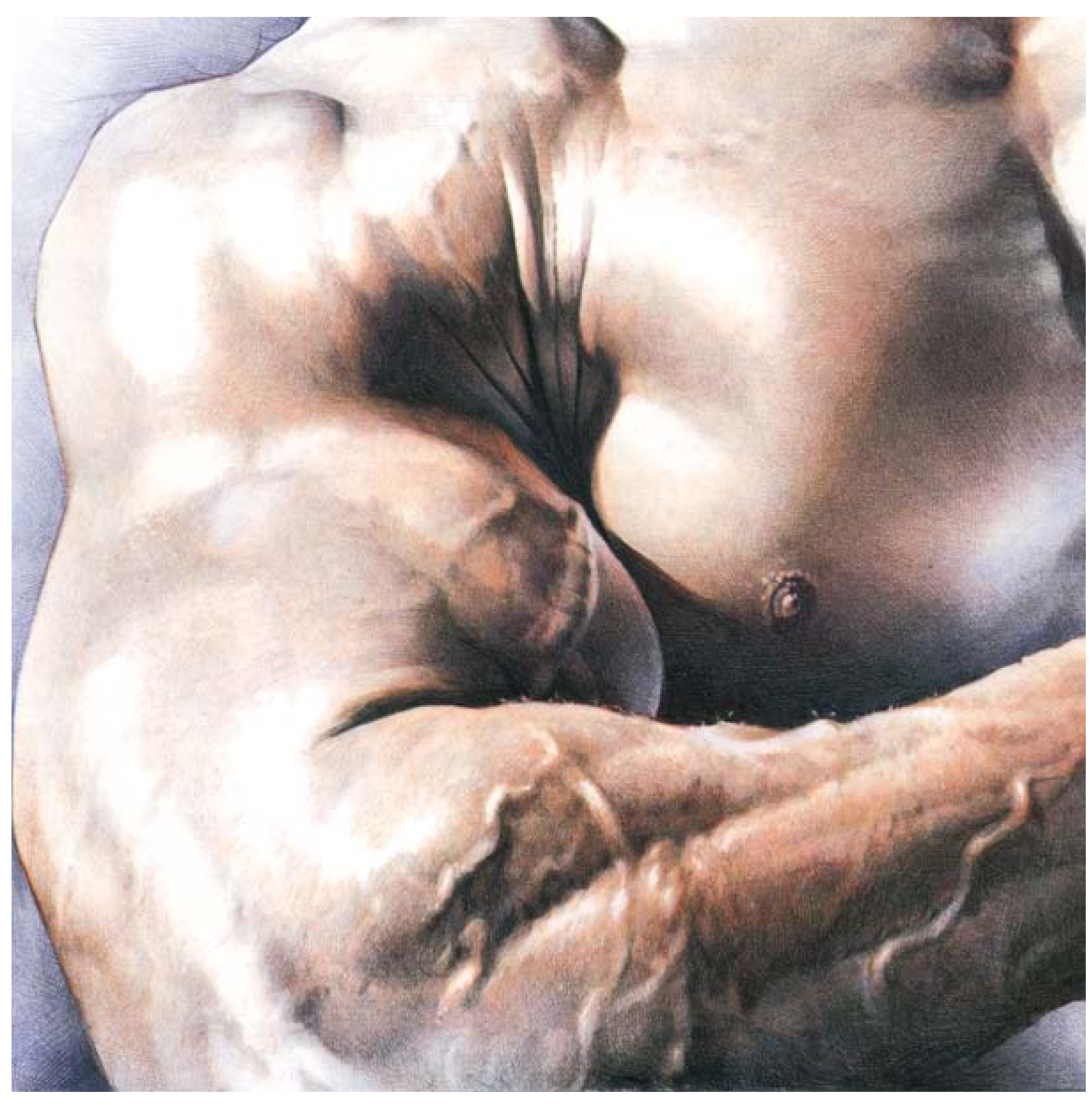
INVESTIGACION y CIENCIA

BURBUJAS QUE CONVIERTEN EL SONIDO EN LUZ

MICROCIRCUITOS: LOS LIMITES DE SU MINIATURIZACION

MECANISMOS CONTROLADORES DE GENES

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



FORMACION DE MUSCULOS FUERTES

ABRIL 1995
700 PTAS.



Abril de 1995 Número 223



Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN 150 YEARS OF INNOVATION

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

J. M. García de la Mora: *Población, pobreza y entorno local*; J. P. Campos: *Sonoluminiscencia: el sonido en la luz*; Santiago Torres: *Mecanismo molecular del control génico*; Mónica Murphy: *Máseres en el firmamento*; Ana M.ª Rubio: *La historia de la testosterona sintética*; Montserrat Domingo: *Superpluma del Cretácico medio*; J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; A. Garcimartín: *Perfiles*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

Ciencia y sociedad:

Joandomènec Ros y Juan Pedro Campos

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: C. Bruce Morser

Página	Fuente
6-7	Christopher Pillitz
8	Lisa Burnett
10	Mike Goldwater
12	Louis Psihoyos
14-15	Ed Kashi, Seth J. Putterman y Robert A. Hiller (*inserto*)
16-17	Jared Schneidman (*arriba*), Tomo Narashima (*abajo*)
19	Jared Schneidman
20-21	Dana Burns-Pizer
23	Jared Schneidman
24	Robert Tjian (*fotografía*) Jared Schneidman (*dibujo*)
25	Robert Tjian
26	Stephen Burley, Universidad Rockefeller; Paul B. Sigler, Universidad de Yale (*arriba*); Edith Wang, Universidad de California, Berkeley (*abajo*)
27	Bettina Crone, *Photo Researchers, Inc.*
41	L. Roig y V. Moreno
43-46	Antonio Granell y Juan Carbonell
47	A. Granell y J. Carbonell (*arriba*); D. Ordáez (*abajo*)
48	Antonio Granell y Juan Carbonell
50	Dimitry Schidlovsky, de Lincoln Greenhill
51	David Malin, Observatorio anglo-australiano
52	Roger Ressmeyer, Starlight (*arriba*); Johnny Johnson (*abajo*)
53-56	Dimitry Schidlovsky
59	V. Noskov y N. Maximov, cortesía de Terry Todd
60	Museo de Historia de la Medicina, París
63	Ronald C. Modra, *Sports Illustrated*
64-65	Ian Worpole
66	© 1977 por Marie Tharp, reproducida con permiso de Marie Tharp
67	Ian Worpole
68	Sam Ogden
70-71	Intel Corporation
72	Asociación de Industrias de Semiconductores; Steven Stankiewicz
73	ASM Litografía (*arriba*); Steven Stankiewicz (*abajo*)
75	National Nanofabrication Facility, Universidad de Cornell
82-83	Andrew Christie
85-89	Documentos Pour la Science

N. B. Número 221, página 32: Fotografía cortesía de G. F. Kurtz; óleo de Mauricio Antón. ABC/Blanco y negro



La portada representa la complexión física armónica de un culturista. Para conseguir esta musculosidad, los deportistas han venido tomando anabolizantes desde los años cuarenta, pero la práctica se ha prohibido. Los médicos dan ahora esos fármacos a un número creciente de varones en proceso de envejecimiento para mejorar su bienestar. La tendencia puede ayudar a salvar el vacío entre el uso legal y el ilegal de esteroides (véase "La historia de la testosterona sintética", de John M. Hoberman y Charles E. Yesalis, en este mismo número). Dibujo de C. Bruce Morser.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Philip Morrison, *Book Editor*; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; Ricki L. Rusting; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
DIRECTOR, ELECTRONIC PUBLISHING Martin Paul

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

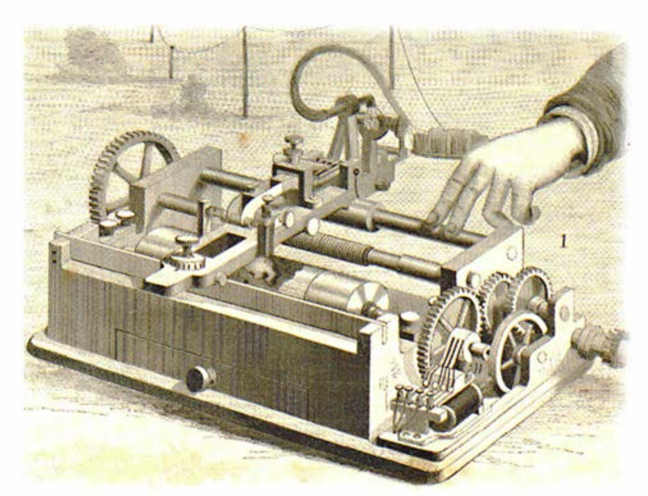
Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Gracias al empleo de una nueva resina sintética conocida como Lanaset, el comercio ofrece una lana que conserva su aspecto original sin encoger, incluso tras repetidos lavados y planchados o limpiezas en seco. Aplicada al tejido, la Lanaset estabiliza la lana y las mezclas de lana sin afectar a la absorbencia característica de la lana. Además, reduce el enfurtido e impide la formación de pelusa.»

«Los metalúrgicos hace tiempo que se dieron cuenta de las graves deficiencias que presenta el examen de las superficies metálicas con microscopio óptico. Es muy frecuente que la superficie observada no ofrezca una evidencia suficiente del tamaño real de los detalles y, muchas veces, es incluso engañosa. Sin embargo, una técnica microrradiográfica recientemente desarrollada es capaz de ofrecer una indicación de los contornos tridimensionales de la estructura del metal y puede revelar la distribución e identidad de los componentes químicos del metal de una manera precisa.»



1. Transmisor electroartógrafo

«Una invención reciente que aumenta la seguridad de vuelo manteniendo libres de hielo las hélices de los aviones consiste en pintar o rociar las palas de las hélices con una laca química llamada Icelac; de color negro, ésta posee una consistencia parecida a la de la glicerina y se aplica sin dificultad para dar una superficie brillante y adhesiva. Esa superficie antihielo se conserva durante varios miles de horas.»

«Son menos de la mitad las granjas estadounidenses que disponen de electricidad. Cierto es que las líneas de alta tensión han llevado tan versátil servidor a cientos de miles de granjas, pero apenas si se ha arañado el mercado. Las líneas de alta tensión resultan caras y no es posible ponerlas en explotación en todos los lugares.»

«Tras permanecer toda una noche a temperaturas atmosféricas muy inferiores a los cero grados centígrados, los autobuses reciben ahora un fuerte incremento de temperatura merced a un calefactor portátil "Janitrol", como los que se desarrollaron para precalentar los aviones en las bases aéreas de Alaska. Un aumento térmico de 120 o 130 grados C permite al artefacto emitir calor a temperaturas subcero.»

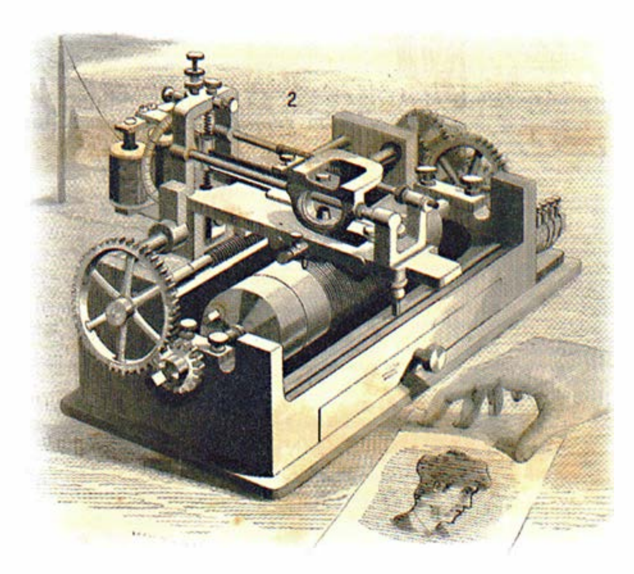
...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Gracias a las acciones combinadas de las presiones elevadas y el frío intenso, el hidrógeno se ha rendido, por fin, a la licuefacción. Hasta ahora el hidrógeno se había resistido encarnizadamente a todos los intentos de licuarlo y el hecho de que su obstinación se haya vencido hace desaparecer el único elemento gaseoso conocido sin licuar. Por tanto, hasta que a la lista de sustancias químicas simples aumente con gases más tenues no cabe esperar más avances en esta línea de investigación.»

«Para que pueda montarse en todos los receptores telefónicos se ha preparado un sencillo cojín neumático de suave tacto al oído. Está hecho de caucho blando y encaja dentro de un aro metálico que se monta a presión sobre el extremo del receptor, formando así una cámara de aire cuya función es anular eficazmente los zumbidos y chasquidos tan molestos a los usuarios del teléfono.»

«Un aula escolar ideal debe brindar una superficie de suelo de 1,4 metros cuadrados a cada alumno y un suministro de más de 5600 metros cúbicos de aire por minuto por cada persona presente en la sala. Se aseguraría así la libertad de movimiento de todos los niños y una saludable cantidad de aire. Es opinión en Francia que el aula debe poseer una superficie de ventanas igual a un cuarto de la superficie del suelo. Se cree además que lo mejor es que los alumnos dispongan de asientos y pupitres individuales.»

«Cuando el teléfono fue presentado a la atención del mundo y la voz humana se hizo audible a kilómetros de distancia, surgieron soñadoras visiones de otras combinaciones de fuerzas naturales mediante las cuales podría conseguirse la visión de escenas distantes a través de cables inanimados. Hoy ya puede afirmarse que ese mismo cable inanimado y su corriente eléctrica transmitirán y grabarán una copia de una fotografía a kilómetros de distancia del original. Tal como se muestra en las ilustraciones adjuntas, el electroartógrafo, que recibe el nombre de su inventor, Mr. N. S. Amstutz, envía copias de fotografías a cualquier distancia y las reproduce por el otro extremo del cable, grabando en línea, listas para la prensa de imprimir.»



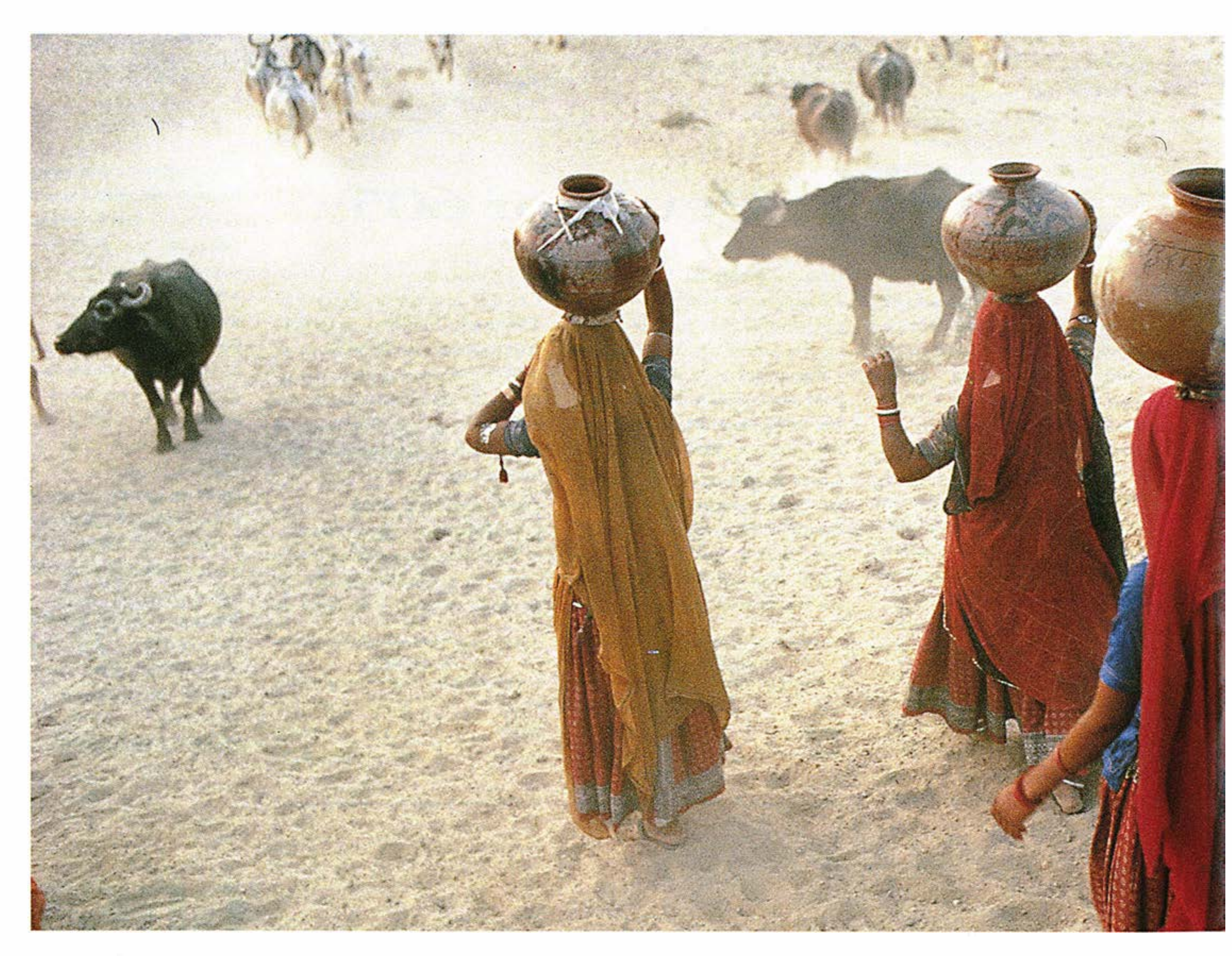
2. Receptor electroartógrafo

Población, pobreza y entorno local

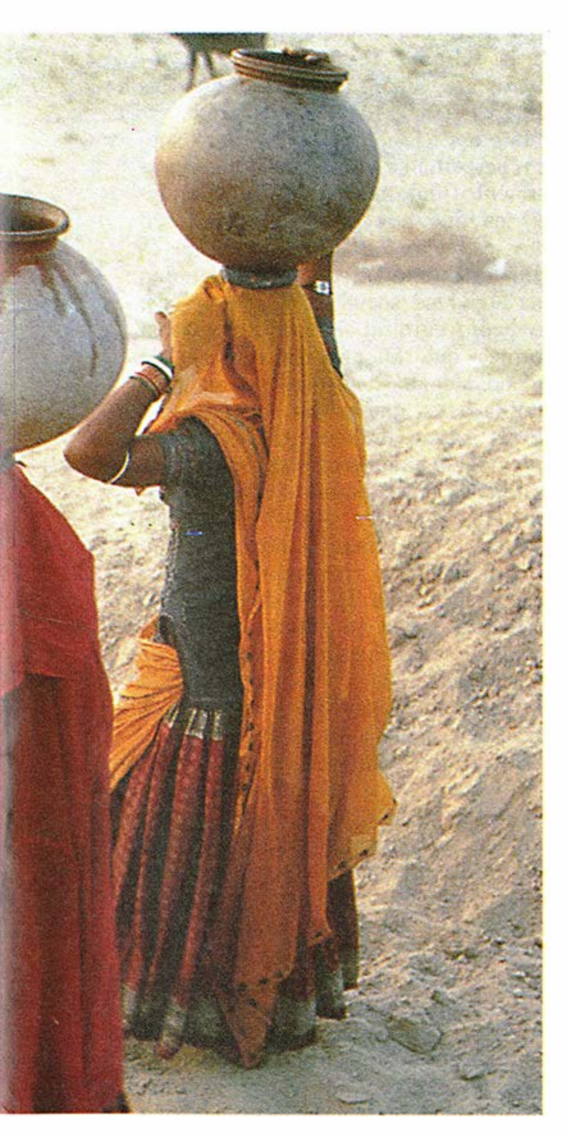
A medida que se retiran los bosques y secan los ríos, adquiere mayor valor para los padres el trabajo de los hijos, creándose un círculo vicioso que acaba atrapando a las familias en la pobreza

Partha S. Dasgupta

Sobre demografía, lo mismo que sobre política, cada uno tenemos nuestra propia opinión. Para algunos, el crecimiento demográfico sería la causa de la pobreza y de la degradación del entorno. Otros permutarían los elementos de esta cadena arguyendo, por ejemplo, que la pobreza es, más que la consecuencia, la causa de que vaya en aumento el número de habitantes. Sin embargo, ni siquiera al estudiar las semiáridas regiones del Africa subsahariana y del subcontinente indio los economistas han considerado interconectados la pobreza, el crecimiento demográfico y el entorno local. La investigación de cada factor ha seguido su rumbo, dejando el tratamiento de las interacciones en manos de periodistas, más descriptivos que analíticos.



Con todo, algunos hemos dedicado los últimos años a un estudio más pormenorizado de las posibles relaciones entre tales ingredientes. En nuestro enfoque combinamos las hipótesis de trabajo con los resultados empíricos ofrecidos por la antropología, la demografía, la ecología, la economía, las técnicas alimentarias y la ciencia política. Centrándonos en el número inmenso de pequeñas comunidades rurales que viven en las zonas más pobres del mundo, hemos acotado las circunstancias en que el aumento de población, la pobreza y la degradación de los recursos locales se fomentan entre sí. Reunidos todos los datos de la investigación, resulta obvio que ninguno de los tres elementos es, por sí solo, causa directa de los otros dos, pero cada uno influye en los otros y es, a su vez, influido por ellos. Esta nueva perspectiva tiene importantes consecuencias para las políticas que traten de mejorar las condiciones de vida de los habitantes más pobres del mundo.



A diferencia de esta nueva perspectiva, ceñida a la experiencia local, los libros al uso sobre ecología y aumento demográfico se decantan por una visión global. Y así denuncian el peligro que corre el planeta con un crecimiento demográfico sin freno. Aunque tan parcial enfoque sirva de algo, de entrada ha desviado la atención de la miseria económica actualmente endémica. El desastre no es algo que los más pobres hayan de aguardar: lo están ya sufriendo.

Además, en los países subdesarrollados, las decisiones sobre el número de hijos y el acceso a la educación, los alimentos, el trabajo, la sanidad y los recursos locales se toman, en buena medida, dentro de los propios hogares. Vale, pues, la pena estudiar los nexos entre pobreza, crecimiento demográfico y entorno desde un sinnúmero de puntos de vista locales e incluso individuales.

La familia presenta rasgos variantes en las distintas partes del mundo. Gary S. Becker se enfrentó ya, hace algunos años, a esta dificultad. Valiéndose de una versión abstracta del concepto de hogar, indagó la forma en que las elecciones hechas en el seno de la unidad familiar respondían a los cambios operados en el mundo exterior; por ejemplo, respecto a las posibilidades de empleo, acceso a los créditos, a los seguros, asistencia médica y educación.

Ese método, lo advertí al comenzar mis investigaciones unos cinco años después, adolecía de un defecto: estudiaba las familias por separado, sin abordar las dinámicas de influencias recíprocas entre unidades. Además de comprender las fuerzas que movían a las parejas a rodearse de una prole numerosa, me interesaba averiguar por qué una razonada decisión de tener hijos, tomada en el ámbito de un hogar, acababa gravando a las demás familias del poblado.

Introducido de pleno en el estudio de tales decisiones, descubrí un segundo defecto en el enfoque de Becker y seguidores: dando por descontado que en la toma de decisión participaban los adultos por igual, habíase concedido una desmesurada confianza al proceso. La verdad es que el control sobre las decisiones de una familia no responde a un guión uniforme. Para adentrarme en el proceso de toma de decisiones, debía saber quién lo conducía.

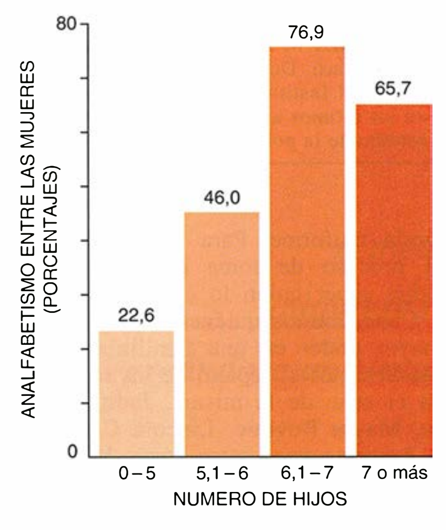
PARTHA S. DASGUPTA se formó en Varanasi, Delhi y Cambridge. Presidente del Instituto Internacional Beijer, en los últimos años se ha consagrado al estudio de la pobreza y la malnutrición.

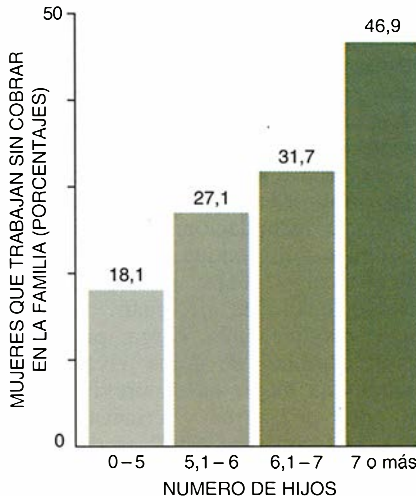
Conoceremos quiénes disfrutan del mayor poder en una familia cuando descubramos el reparto de los recursos en el seno de la misma. Judith Bruce, Mayra Buvinic, Lincoln C. Chen y Amartya Sen, entre otros, han observado que, en muchos casos, la repartición de los recursos familiares es desigual, incluso después de consideradas las diferencias que obedecen a necesidades peculiares. En los hogares pobres de la India, hombres y muchachos reciben más comida que mujeres y niñas; a los viejos se les reparte menos que a los jóvenes.

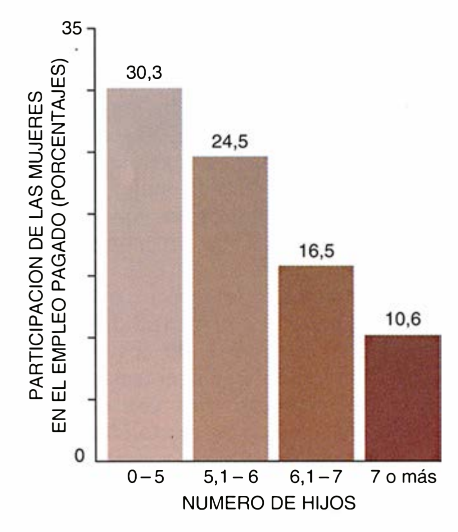
Esa falta de equidad persiste al decidir la fecundación. Prima el juicio del varón, aunque el peso de la carga recaiga sobre la mujer. Para hacerse una idea de cuán onerosa puede resultar dicha carga, piénsese en la cantidad de hijos vivos que tendría una mujer que sobreviviera a sus años de partos y crianzas. Esa "tasa de fecundidad total" es de entre seis y ocho en el Africa subsahariana. Allí, cada parto normal supone que a los nueve meses de embarazo se añaden otros nueve de lactancia. Con lo que en una sociedad en la que la esperanza de vida para la mujer sea de 50 años y se cifre en siete hijos la tasa de fecundidad, casi la mitad de la vida se la pasa la mujer adulta llevando en su vientre un vástago o amamantándolo. Y eso sin contar los embarazos frustrados.

Otro indicador del precio que pagan las mujeres es la mortalidad materna. En la mayoría de los países pobres, las complicaciones relacionadas con el embarazo son, con mucho, la principal causa de mortalidad. En ciertas zonas del Africa subsahariana muere una de cada 50 parturientas. (En Escandinavia la tasa actual es una de cada 20.000.) Con una tasa de fecundidad total de siete o más hijos, la probabilidad de que una mujer en edad fértil no llegue a vivir

1. EL ACARREO DEL AGUA ocupa varias horas del día para una familia del Rayaztán, al oeste de la India. A medida que los recursos se van dispersando y alejando, adquiere mayor valor el aumento de manos que ejecuten las tareas diarias, y las familias tienen más hijos. El crecimiento demográfico ejerce mayor presión sobre el entorno, la cual suscita la necesidad de contar aún con más manos, o sea, de engendrar más hijos, formándose de este modo un ciclo en el que aumentan continuamente la pobreza, la población y el deterioro ambiental.







2. TASA DE FECUNDIDAD total en el mundo (el promedio de hijos que tiene la mujer); aumenta por lo general en un país con el porcentaje de mujeres iletradas (*arriba*) o que hacen gratis las labores hogareñas (*centro*). La fecundidad disminuye cuando las mujeres realizan una fracción importante del empleo remunerado (*abajo*). El que una mujer aporte ingresos da mayor peso a sus decisiones en el seno de la familia y le permite resistir las presiones que se le hagan en demanda de que conciba más hijos.

todo ese intervalo es, aproximadamente, de uno a seis. Engendrar hijos equivale a jugar a una especie de ruleta rusa.

Siendo tan alto el coste de la procreación, cabe esperar que las mujeres, si se les diese a elegir, optarían por tener el menor número de hijos. Pero, ¿es más alta la tasa de natalidad en las sociedades en que las mujeres tienen menos poder dentro del ámbito familiar? Los datos sobre la condición social de la mujer en 79 países del Tercer Mundo nos muestran un cuadro inconfundible: elevada fecundidad, ingentes proporciones de analfabetismo, escasa participación en el empleo retribuido y un alto porcentaje de trabajo en casa sin remuneración; todos estos factores se influyen recíprocamente. La escueta estadística no permite discernir cuáles de ellos son causantes de la alta fecundidad y cuáles están meramente en correlación con la misma. Pero los datos cuadran bien con la posibilidad de que la falta de empleo remunerado y de instrucción limiten la capacidad de la mujer de tomar decisiones y promuevan, por ende, el aumento de la población.

Hay buenas razones para pensar que la falta de un empleo remunerado reduce el poder decisorio más que la falta de instrucción. Nadie cuestiona la necesidad de que los países pobres inviertan en campañas de alfabetización. Pero los resultados pueden ser decepcionantes. En contra de que la educación subvencionada sea ventajosa para las familias pobres militan muchos factores. Si los hijos deben trabajar dentro y fuera del hogar, el retenerlos en la escuela (aunque ésta sea barata) resulta caro. En las sociedades patrilineales, las muchachas instruidas pueden ser también consideradas como menos dóciles y más difíciles de casar. De hecho, los beneficios del subsidiar inclusive a la educación primaria van a parar en su mayor parte a las familias más acomodadas.

Por contra, las políticas orientadas a aumentar la productividad de las mujeres, fuera y dentro de casa, conferirían a éstas mayor poder, sobre todo en el ámbito familiar. La independencia económica de la mujer elevaría, para el varón, los costes implícitos de la procreación (carga que a las mujeres les impide procurar mayores ingresos familiares). No negamos el valor de la inversión pública en educación primaria y secundaria; advertimos llanamente que esa inversión no es la panacea del problema demográfico.

Empieza a reconocerse en diversos foros las graves consecuencias que para la superpoblación del Tercer Mundo trae consigo la desigualdad de los sexos. La Conferencia de la ONU sobre Población y Desarrollo celebrada en El Cairo en septiembre de 1994 puso de realce los derechos de la mujer en el ámbito de la procreación y los medios por los que se los podría proteger y promover. Pero en el problema de la población hay algo más que las desigualdades de los sexos. Aun cuando ambos progenitores comparten la decisión de tener un hijo, son varias las vías por las que esa elección llega a convertirse en gravosa para la comunidad. Esas vías se han descubierto indagando los motivos que inducen a procrear.

Un motivo, común a toda la humanidad, es considerar a los hijos como fines en sí mismos. Este motivo va desde el deseo de tener hijos porque traen alegría y gozo hasta el querer obedecer los dictados de la tradición y de la religión. Semejante requerimiento dimana del culto a los antepasados, en el que, entendiéndose la religión como un acto reproductor del linaje, se exige que las mujeres den a luz muchos hijos.

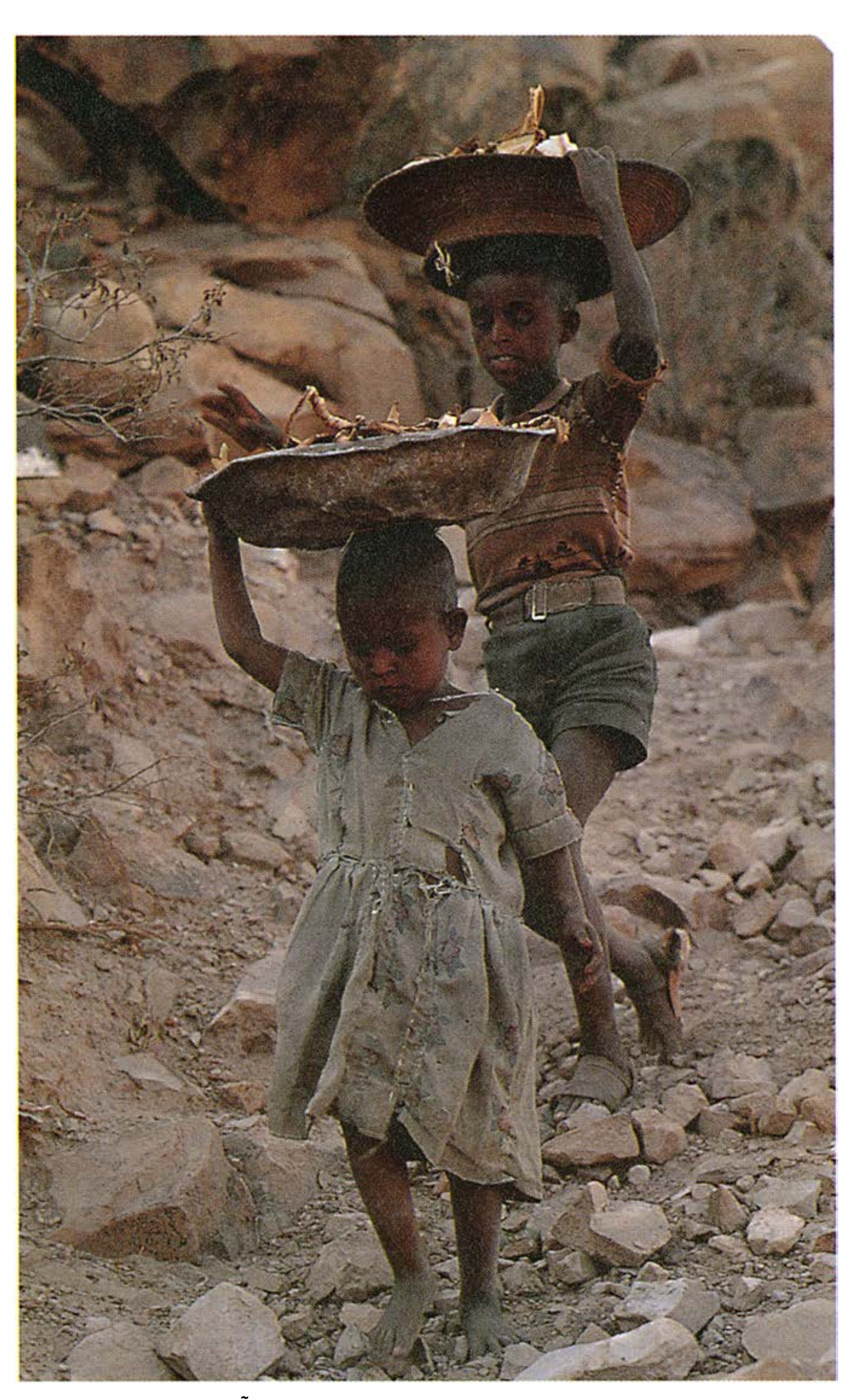
Las tradiciones de este género suelen perpetuarse mediante el comportamiento imitativo. En las comunidades en que hay lazos de parentesco muy estrechos, la procreación no es sólo un asunto privado, sino también una actividad social en la que influye el medio cultural. A menudo existen normas que alientan unas tasas de fecundidad altas, normas que ninguna familia desea quebrantar. (Esas normas quizás hayan durado más que cualquier razonable fundamento que las sustentara en el pasado.) Consiguientemente, mientras todos los demás aspiren a tener familia numerosa, en ningún hogar se atreverán a desviarse por su cuenta de esa directriz. De este modo, una sociedad puede aferrarse a una forma de conducta que la mantenga tal cual, caracterizada por una alta fecundidad y menguados logros en materia de instrucción.

Lo que no significa que esa sociedad vaya a vivir así perpetuamente. Como en todo, las gentes difieren también por el grado de apego a las tradiciones. Habrá quienes, por una razón u otra, quieran hacer experiencias, corran riesgos y rehúyan confundirse con el vulgo. Son los inconformistas, los que abren camino. Una mayor instrucción de la mujer podría poner en marcha un proceso así.

Entre otros motivos más para procrear se incluye el de ver a los hijos como bienes de producción. En una

economía rural, donde las posibilidades de ahorro escasean, los padres ven en los hijos el seguro de su vejez. Mead Cain estudió largamente este aspecto. No tan discutido, al menos hasta hace poco, es otro tipo de motivación explorado por John C. Caldwell, Marc L. Nerlove, Anke S. Meyer, Karl-Göran Mäler y el autor. De acuerdo con el mismo, los hijos no sólo aseguran mañana la vejez de los padres, sino que constituyen hoy una fuente de ingresos.

La mayoría de los países del Tercer Mundo vive en una economía de subsistencia. Su población rural subsiste a duras penas con la recogida directa de los productos vegetales y animales. Hasta para las tareas sencillas se necesita mucha mano de obra. Por añadidura, en los hogares del campesinado pobre no hay acceso a las modernas fuentes de energía doméstica o de agua corriente. En las regiones áridas o semiáridas el sitio donde abastecerse de agua puede no estar ni siquiera cerca. Ni tampoco lo está la madera que sirve de combustible cuando los bosques se van esquilmando. Además, para cultivar cereales, pastorear el ganado, cocer los alimentos y elaborar sencillas mercaderías, los miembros de una familia han de dedicar no menos de seis horas diarias a ir por agua y a recoger forraje y leña.



3. RECOGIENDO LEÑA PARA EL FUEGO del hogar es como contribuyen estos hermanos, niño y niña, al trabajo que necesita realizar diariamente una familia. En la mayoría de los países del Tercer Mundo, las familias cuentan con los niños para llevar a cabo diversas tareas, como por ejemplo, pastorear vacas y cabras, cuidar a sus hermanitos, ir por agua y buscar leña y forraje.

Se necesita, pues, que los niños trabajen incluso cuando sus padres están en la flor de la vida. Las familias poco numerosas son simplemente inviables: cada hogar necesita muchas manos. En algunas partes de la India se ha observado que los niños de entre 10 y 15 años de edad trabajan por lo menos una vez y media más de horas que los varones adultos. A la edad de 6 años, los niños de la India rural vigilan el ganado, cuidan a sus hermanitos, van por agua, recogen leña, estercolean el campo y le echan la paja a los animales. Hasta puede ser que aumente la utilidad de cada mano extra al disminuir la disponibilidad de recursos, midiendo ésta, digamos, por la distancia a las fuentes de agua y de combustible.

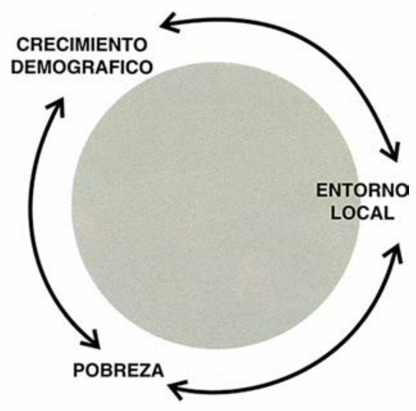
La necesidad de muchas manos puede llevar a una presión destructora del entorno, en particular cuando los padres no tienen que pagar todo el precio de la crianza de sus hijos sino que comparten esos costes con la comunidad. En los últimos años han cambiado las costumbres que antes regulaban el uso de los recursos locales. Desde tiempo inmemorial, habían sido comunales las charcas y los pozos de un pueblo, las eras, los pastos y los bosques locales. Esta forma de control permitía a los habitantes de regiones semiáridas afrontar unidos sus riesgos. Según observan Elinor Ostrom y otros, las comunidades han defendido contra la explotación excesiva esos bienes comunes invocando normas, poniendo multas a la conducta desviante y por otros medios parecidos.

Pero el proceso mismo del desarrollo económico puede erosionar los métodos de control tradicionales. El auge de la urbanización y de la movilidad puede ejercer parejo efecto. Las reglas sociales corren peligro por las contiendas civiles y por el irse apoderando de los recursos los terra-

tenientes o el estado. Al degradarse las normas, los padres le pasan algunos de los costes de sus hijos a la comunidad sobreexplotando los bienes comunales. Si continúa abierto el acceso a compartir los recursos, los padres procrean demasiados hijos, lo cual lleva a una mayor densidad y a que aumente la predisposición a enfermar, así como a que crezca la presión sobre los recursos. Pero, de suyo, ninguna familia tiene en cuenta el daño que inflige a las otras trayendo al mundo más hijos.

Los costes que supone a los padres el tener hijos los alivia también la ayuda de los parientes. Aunque el precio principal del tener un hijo lo paga la madre, los costes de criarlo se reparten a menudo entre el clan. Caroline H. Bledsoe y otros han observado que, en gran parte del Africa subsahariana, la crianza de los hijos se hace en común, lo que en las regiones semiáridas viene a ser una forma de proporcionarse un seguro colectivo. En algunas zonas del oeste africano, casi un tercio de los niños viven siempre con parientes. Sobrinos y sobrinas poseen los mismos derechos de alojamiento y de sustento que los hijos. En un trabajo reciente he hecho ver que este tipo de organización favorece una excesiva descendencia si los beneficios que a los padres ello les reporta son superiores a los costes compartidos con la comunidad.

Además, donde los vínculos conyugales son débiles, como ocurre en el Africa subsahariana, con frecuencia los padres no soportan los costes del tener un hijo. Los historiadores de la demografía, así E. A. Wrigley, han advertido una importante diferencia entre la Europa occidental del siglo XVIII y las sociedades preindustriales modernas. En aquélla, casarse significaba fundar una nueva familia; por lo cual, la gente tardaba en contraer matrimonio, pues éste también significaba que los padres habían de correr con los gastos de la crianza de sus hijos. En Francia, las tasas de fecundidad bajaron antes que las de mortalidad, antes de que existieran las modernas técnicas de planificación familiar y antes de que las mujeres accedieran a la cultura.





REGION	TASA DE FECUNDIDAD TOTAL
AFRICA SUBSAHARIANA	DEL 6 AL 8
INDIA	4
CHINA	2,3
JAPON Y DEMOCRACIAS OCCIDENTALES INDUSTRIALIZADAS	DEL 1,5 AL 1,9

4. LA POBREZA, el aumento de población y la degradación ambiental son factores que se influyen recíprocamente formando un ciclo (*arriba*). La tabla (*abajo*) muestra que la fecundidad es mayor en los países más pobres.

El contar con que la procreación tendrá bajos costes y rendirá altos beneficios fomenta las familias numerosas. En determinadas circunstancias puede desencadenarse un proceso infernal. A medida que se agotan los recursos comunitarios, se requieren más manos para el acarreo diario de leña y agua. En consecuencia, se engendran más hijos, y con ello, a la vez que se amplía la familia, se ejerce una presión más dura contra el entorno. Cuando sucede esto, la fecundidad y la degradación ambiental se refuerzan mutuamente y crecen en espiral. Para cuando algún conjunto de factores contrarrestantes —ya sean medidas públicas, ya la disminución de los beneficios por el excesivo aumento de hijos— detiene o frena esa espiral, puede que millones de seres humanos se hayan hundido más en su pobreza.

Datos recientes recabados por el Banco Mundial en el Africa subsahariana han revelado innegables correlaciones entre la pobreza, la fecundidad y el deterioro del medio ambiente. Esos datos no pueden poner de manifiesto conexiones causales, pero sí corroboran la idea de que hay un proceso de retroalimentación tal como el que he descrito. Con el tiempo, el efecto de esa espiral puede ser enorme, como lo evidencian las luchas por los recursos.

Las víctimas más castigadas entre los que sobreviven son los marginados de la sociedad —los emigrantes y los desposeídos de todo, algunos de los cuales acaban siendo esos demacrados mendigos que se ven por las calles de las ciudades de los países subdesarrollados. Los estudios históricos de Robert W. Fogel y las in-

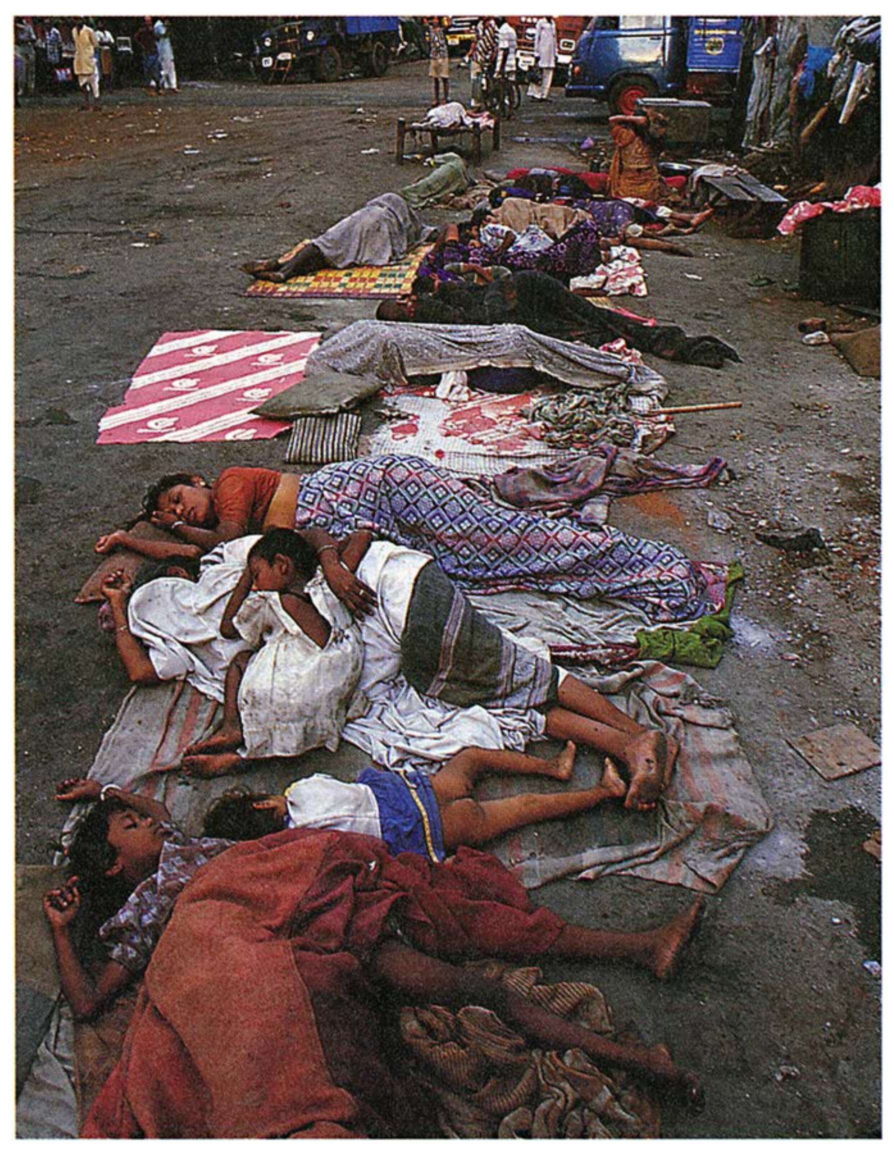
Producto nacional neto "verde"

Algunos economistas creen que el aumento de la población es conveniente para el crecimiento económico. Aducen estadísticas según las cuales, excepto en el Africa subsahariana, la producción de alimentos y la renta bruta *per capita* han venido aumentando desde la Segunda Guerra Mundial. La tasa de supervivencia infantil, la alfabetización y la esperanza de vida han mejorado hasta en los países pobres, a pesar de que el crecimiento demográfico ha sido mucho más rápido que en el pasado.

Una debilidad de este argumento es que las estadísticas en que se funda no tienen en cuenta el agotamiento de la base ambiental de los recursos, de la que en última instancia depende toda la producción. Esta base incluye el suelo y su cubierta vegetal, el agua dulce, el aire que respiramos, los caladeros y las masas forestales. Es tentador, sin duda, fijándose en las tendencias pretéritas, inferir que podemos estar seguros de que el hombre superará las presiones que el auge de la población ejerce sobre el ambiente natural.

Pero me temo que las cosas no sucederán así. Las industrias están ya consumiendo nada menos que el 40 % de la energía neta creada por la fotosíntesis en toda la Tierra. Geoffrey M. Heal, John M. Hartwick, Karl-Göran Mäler y yo mismo hemos propuesto que se incluya en los cálculos la degradación ambiental y se hable, más bien, del producto nacional neto (PNN). El cual se obtiene deduciendo del producto nacional bruto el valor de, por ejemplo, el carbón extraído o los árboles cortados.

Así, el "PNN verde" reflejará no sólo la producción actual, sino también la posibilidad de producción futura a partir de la base de recursos que leguemos a las generaciones que nos sucedan. Visto a través del PNN, el futuro aparece mucho menos sonrosado. Yo no sé de ningún ecologista que piense que una población de 11.000 millones de habitantes (la prevista para el año 2050) podrá mantenerse a un nivel de vida material como el que tiene hoy, digamos, el europeo medio.



5. INDIGENTES durmiendo en una calle de Bombay. Son emigrantes que se fueron de sus pueblos cuando la espiral de la pobreza, el aumento demográfico y el deterioro del entorno les hicieron imposible seguir viviendo allí.

vestigaciones teóricas de Debraj Ray demuestran que la espiral a la que me he referido no es sino un modo de crear indigentes. Los mendigos hambrientos no son unos vagos: tienen que esforzarse mucho para vivir en esa precariedad. Como han sufrido de malnutrición, no entran ya en el mercado laboral.

En cambio, las familias con más acceso a los recursos pueden limitar el número de hijos y elevar su nivel de renta. Tengo la impresión de que entre las clases medias urbanas del norte de la India se ha conseguido llegar ya a una tasa de fecundidad más baja. La India es un ejemplo de cómo el círculo vicioso que he descrito puede hacer que persista una extrema pobreza mientras en el resto de la sociedad aumenta el bienestar. El llamado efecto de san Mateo —"Al que tiene se le dará y vivirá en la abundancia, mientras que al que no tiene se le quitará incluso lo poco que le quede"— se cumple implacablemente en los países pobres.

Este análisis sugiere que el modo de reducir la fecundidad es romper la espiral. El que los padres prefieran más hijos en vez de admitir los métodos contraceptivos explica en gran parte el comportamiento reproductor vigente en los países en desarrollo. Deberemos, por tanto, acertar con unas políticas que cambien las opciones posibles para los hombres y las mujeres, a fin de que las parejas decidan limitar el número de vástagos.

En esto desempeñan un papel especial las libertades civiles, en cuanto opuestas a la coerción. Hace algunos años, mi colega Martin R. Weale y yo comprobamos, mediante análisis estadísticos, que hasta en los países pobres las libertades políticas y civiles corren parejas con las mejoras de otros aspectos de la vida tales como la renta *per capita*, la esperanza de vida y la tasa de supervivencia infantil.

Hay, pues, razones para pensar que dichas libertades no son sólo deseables en sí mismas, sino que, además, capacitan a las personas para prosperar económicamente. No hace mucho, Adam Przeworski demostró que la fecundidad es más baja en los países donde los ciudadanos disfrutan de libertades públicas. (A excepción del caso único de China.)

La mejor solución para las regiones semiáridas del Africa subsahariana y del subcontinente indio consiste en desplegar simultáneamente varias políticas. Los servicios de planificación familiar, sobre todo cuando van acompañados de buena asistencia sanitaria, y todas las medidas que refuercen el poder de las mujeres ayudan sin duda mucho. A medida que se van quebrantando las normas y se tambalean los sistemas de apoyo tradicionales, las mujeres que deciden cambiar de conducta reproductiva se vuelven financiera y socialmente más vulnerables. De ahí que, para suavizar la transición hacia el tener menos hijos, sea esencial una campaña en pro de la instrucción y el empleo femenino.

Pero no es menos imprescindible fomentar la coordinación social y aumentar la seguridad económica de los pobres. Suministrándoles combustibles y agua potable a precios baratos se reducirá la utilidad de las manos extra. Cuando un hijo llegue a parecer caro, terminará el codicioso atractivo de las altas tasas de fecundidad.

Cada una de las recetas sugeridas por nuestro nuevo modo de ver los nexos que unen población, pobreza y degradación ambiental es aconsejable por sí misma y no sólo cuando paramos mientes en esos problemas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

POPULATION, ECONOMIC DEVELOPMENT, AND THE ENVIRONMENT. Dirigido por Kerstin Lindahl Kiessling y Hans Landberg. Oxford University Press, 1994.

WORLD DEVELOPMENT REPORT. Publicación anual del Banco Mundial.

POVERTY, INSTITUTIONS AND THE ENVIRONMENTAL RESOURCE BASE. Partha Dasgupta y Karl-Göran Mäler en *Handbook of Development Economics*, vol. 3. Dirigido por T. N. Srinivasan y otros. North Holland Publishing, Amsterdam (en prensa).

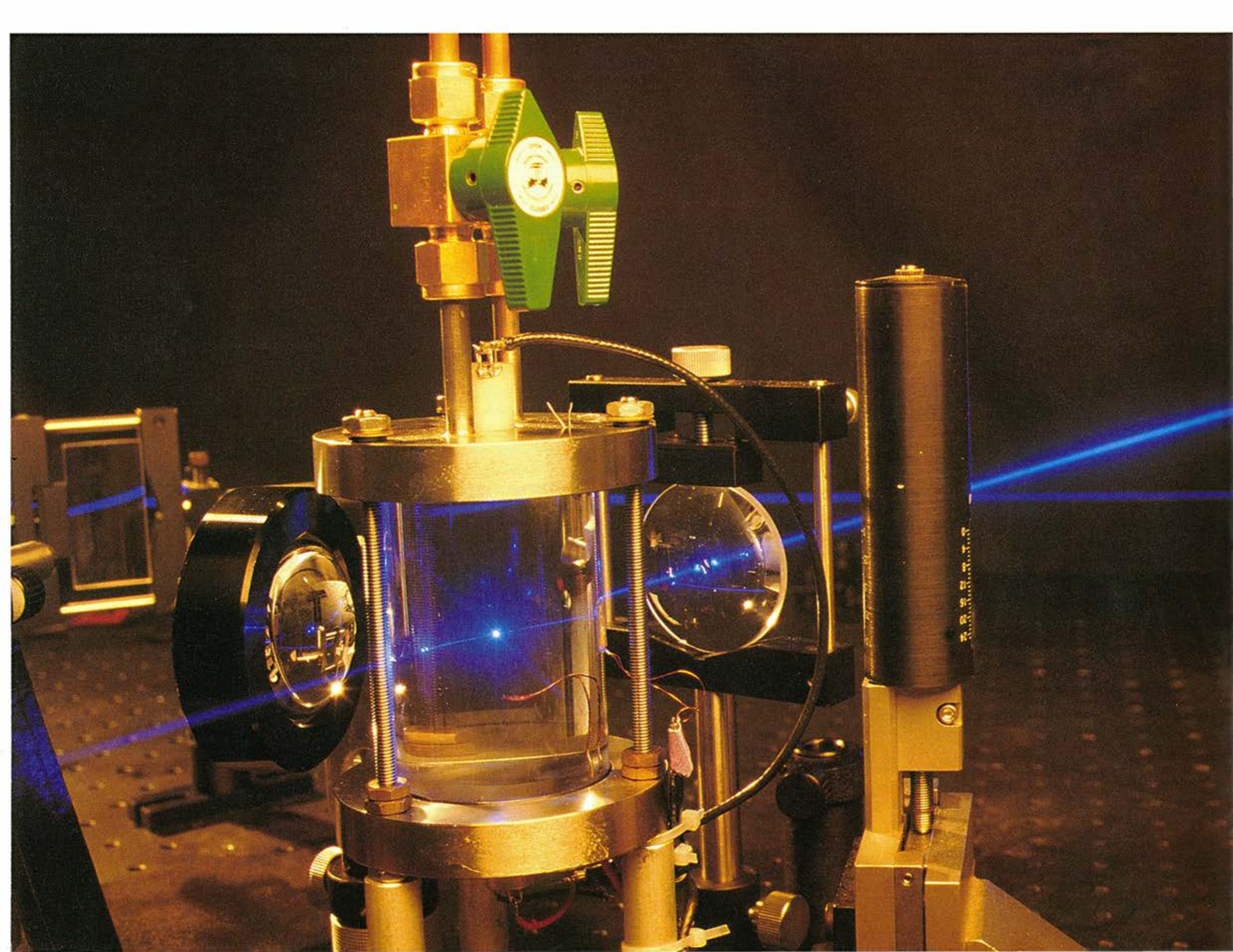
Sonoluminiscencia: el sonido en la luz

Una burbuja de aire puede concentrar la energía acústica un billón de veces y producir así destellos de luz que duran un picosegundo. Hay muchos puntos obscuros en ese fenómeno

Seth J. Putterman

Imagínese que está en una montaña rusa, que asciende despacio, traqueteando, por una de sus largas pendientes. Cuando llega a la cumbre, su vehículo se precipita en caída libre y no deja de acelerarse hasta el fondo. Allí la desaceleración le aplasta contra el asiento. La sensación es la misma que tendría si fuera montado en una burbuja pulsante de aire atrapada en el agua; con una salvedad: la gota alcanzaría velocidades supersónicas y, cuando llegase al fondo, la fuerza que le hundiría a usted en el asiento sería igual a un billón de veces lo que usted pese.

Por lo que se refiere a la burbuja, reacciona a esa fuerza extraordinaria creando un destello de luz durante una minúscula fracción de segundo; luz sobre todo ultravioleta. Ello indica que el interior de la burbuja se pone, cuando detiene su caída libre, mucho más caliente que la superficie del Sol. Una onda sonora puede hacer que la burbuja repita este bamboleo



salvaje más de 30.000 veces por segundo; los destellos, pues, se producen con la regularidad de un reloj.

En la sonoluminiscencia —así se llama el proceso de convertir sonido en luz— la burbuja provoca que la energía de las vibraciones acústicas esté concentrada un billón de veces más. Es decir, la onda sonora que impulsa a la burbuja mide unos centímetros, pero la luz sale de una región cuyas dimensiones son atómicas.

Sigue escapándosenos el mecanismo de semejante fuente de iluminación, barata e insólita. Los destellos son tan breves, que, para medir las propiedades de su luz, debemos recurrir a fotodetectores que reaccionen más deprisa que los empleados por los físicos de altas energías. (La sonoluminiscencia es la única forma de generar destellos de sólo picosegundos que no precisa láseres muy caros.) El proceso físico gracias al cual la sonoluminiscencia consigue tamaña concentración de la energía podría servirles de modelo útil a quienes persiguen el desarrollo de la fusión nuclear controlada. El empeño puesto ahora en desentrañar los misterios de la sonoluminiscencia está generando paradojas nuevas a un ritmo más veloz que soluciona las cuestiones pendientes.

Oí hablar de la sonoluminiscencia a mediados de los años ochenta. Thomas Erber se extrañaba de mi persistente interés por la mecánica de fluidos, centrado en la ecuación de Navier-Stokes, que describe el comportamiento de los fluidos. "Si las ecuaciones de Navier-Stokes son tan excelsas como dices, ¿cómo es que el sonido se convierte en luz?", me espetó; a lo que respondí negando la posibilidad de los fenómenos de sonoluminiscencia. A esto replicó con una larga historia documental. Con la ayuda de Ritva Löfstedt, alumno entonces en la UCLA, hurgué en los papeles de referencia.

Comprobé que, en los años veinte y treinta, unos químicos que trabajaban con unos altavoces elaborados durante la primera guerra mundial para los sistemas de sonar dieron con un fenómeno curioso: un campo sonoro intenso podía catalizar las reacciones de una solución acuosa. Reinhard Mecke, de Heidelberg, comentó entonces a sus colaboradores que la cantidad de energía que hacía falta para que se diese una reacción química es la que se requería para excitar la emisión de luz por un átomo. En consecuencia, sugirió que se buscase una señal de ese tipo. Poco después, en 1934, H. Frenzel y H. Schultes, de Colonia, descubrieron la sonoluminiscencia en un baño de agua excitado por ondas acústicas.

Quizá fuera por la observación común de una chispa que salta cuando se manipula el pomo metálico de una puerta tras haber caminado por una alfombra. Pero, sacasen su inspiración de donde fuera, Frenzel y Schultes explicaron la emisión de luz a partir de la *Reibungselektrizität* o "electricidad fricativa". En su experimento, la onda sonora ponía en marcha el proceso de "cavitación" —desarrollo y colapso de las burbujas en el agua. Compararon el movimiento de las burbujas por el líquido a unos zapatos que se arrastran por una alfombra. La abrasión produce la separación de cargas eléctricas en un medio originalmente neutro. Una chispa libera la carga acumulada. Pero concluían su artículo excusándose con que tenían cosas más importantes de las que ocuparse.

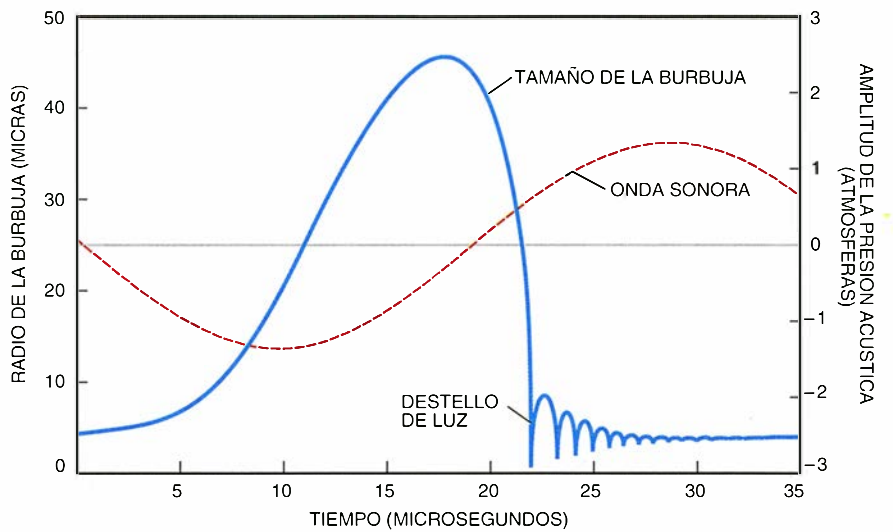
SETH J. PUTTERMAN, cuya investigación se centra en la turbulencia, superfluidez y mecánica cuántica, enseña en la Universidad de California en Los Angeles.

Otros investigadores interesados por el mecanismo subyacente en el fenómeno emprendieron la medición espectral de esta nueva fuente de luz. La fugacidad del fenómeno impidió que llegaran a nada concreto. Las nubes de burbujas que creaban los campos sonoros intensos que emplearon crecían, se derrumbaban y desprendían luz de manera impredecible y asíncrona.

Bradley P. Barber y yo nos entusiasmamos con la idea de caracterizar y desentrañar el mecanismo causante de la sonoluminiscencia. Supe que D. Felipe Gaitán y Lawrence A. Crum habían ya logrado atrapar una burbuja suelta emisora de luz en agua parcialmente desgasificada. Al parecer, mi entusiasmo por su éxito excedía en mucho el suyo. Habían desmantelado el dispositivo experimental y abandonado esa vía de investigación. Pero nos enseñaron a ajustar nuestro aparato para encontrar la sonoluminiscencia de una sola burbuja.

Así, con un matraz de ebullición del laboratorio de química, un osciloscopio del laboratorio de física general, un estéreo doméstico y un tubo fotomultiplicador (un sensor de luz) nos pusimos manos a la obra. En nuestros primeros trabajos inyectábamos una burbuja de aire en el agua con una jeringa. Con los años hemos refinado la instalación. El aparato actual consta de un transductor piezoeléctrico en la parte superior de un cilindro lleno de agua. El transductor es un material cerámico que convierte un voltaje oscilante en una vibración mecánica y genera así ondas sonoras —campos alternos de compresión y expansión— en el agua. Sumergido en ésta hay un trozo de cable eléctrico que sirve de calentador. Cuando lo atraviesa una corriente, se calienta y provoca que hierva el agua a su alrededor. Se forma entonces una burbuja rellena de vapor de agua. Antes de que el vapor

1. PRODUCCION DE LUZ A PARTIR DEL SONIDO, mediante una burbuja de aire atrapada en un frasco cilíndrico de agua desgasificada. El sonido de unos altavoces puestos sobre y bajo el frasco atrapa la burbuja. Durante la parte compresiva de la onda acústica, emerge un destello de luz que dura 50 picosegundos. Un láser mide el tamaño de la burbuja conforme va palpitando con el sonido. La emisión de luz es bastante tenue (*recuadro*).



2. EL VIAJE EN MONTAÑA RUSA de una burbuja pulsante se retrasa ligeramente con respecto a la expansión y la compresión de las ondas sonoras. La burbuja se expande hasta su tamaño máximo justo después de que la presión acústica se haga negativa. Durante la compresión, la burbuja se encoge rápidamente hasta medir menos de una micra de radio, y emite un destello de luz. La burbuja sigue hinchándose y contrayéndose antes de aquietarse.

se condense de nuevo, el aire disuelto en el agua fluye a la bolsa y crea una burbuja de aire.

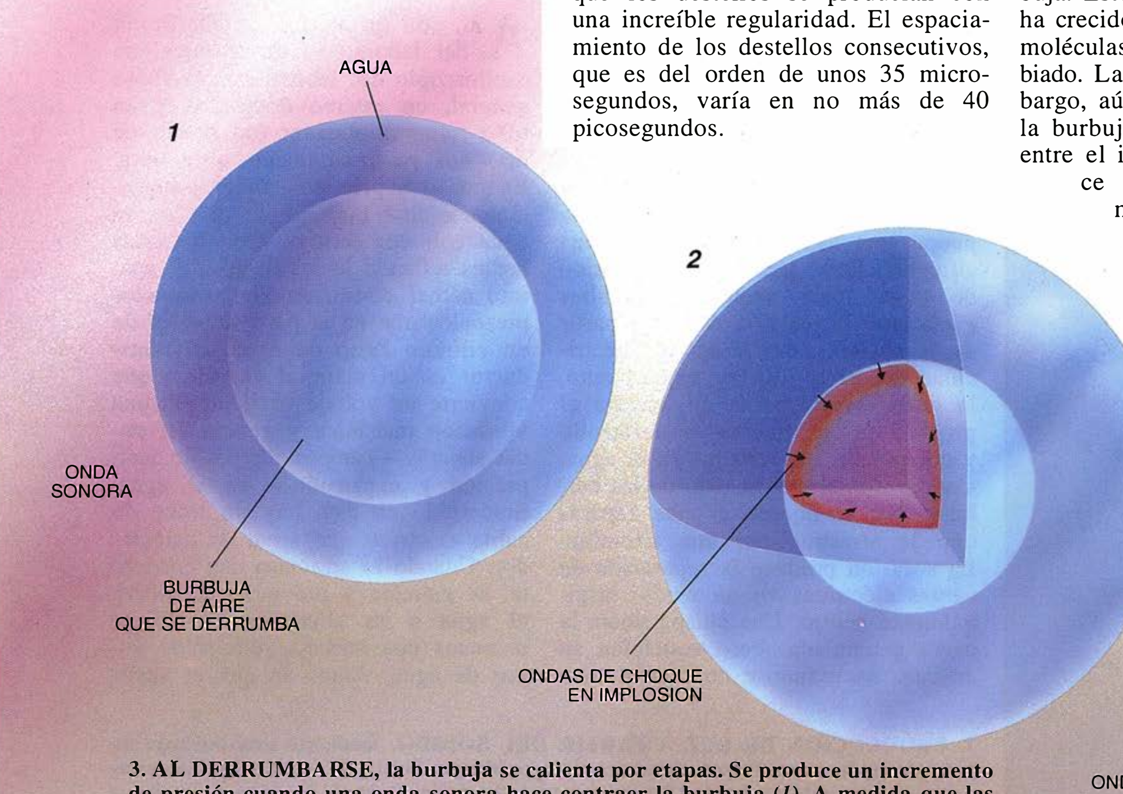
Esta burbuja queda atrapada en el centro de la vasija cilíndrica, donde la fuerza de Arquímedes que lanzaría la burbuja hasta la parte superior se equilibra con la fuerza de las ondas sonoras. Para generar el movimiento de burbuja característico de la sonoluminiscencia, se requieren ondas acústicas equivalentes a unos 110 decibelios. Aunque hablamos de un volumen equiparable al de la alarma de un detector de humos sito a escasos centímetros de distancia, la frecuencia del sonido cae justo por debajo de la franja perceptible por el oído humano.

Nuestro primer objetivo era identificar las escalas temporales que intervenían en el proceso de sonoluminiscencia. En concreto, la duración del destello. Con sorpresa, observamos que esa medición requería el uso de los sensores de luz más rápidos que se conocían. Nuestro análisis arrojó un límite superior de unos 50 picosegundos. Encontramos también que los destellos se producían con una increíble regularidad. El espaciamiento de los destellos consecutivos, que es del orden de unos 35 microsegundos, varía en no más de 40 picosegundos.

Para determinar el radio de la burbuja sonoluminiscente, Barber la iluminó con un láser y midió la luz que se dispersaba del haz. La intensidad de la luz dispersada por un objeto esférico depende del cuadrado del radio de éste. Por tanto, la raíz cuadrada de la señal procedente del fotodetector indica el radio de la burbuja.

Las mediciones muestran que la burbuja arranca con un tamaño ambiente de varias micras, hasta que la parte expansiva del campo sonoro actúa sobre ella. La presión cae entonces, lo que pone al fluido en tensión y provoca que la burbuja se hinche y mida unas 50 micras. La expansión sigue hasta que el campo sonoro pasa de la rarefacción a la compresión.

Cuando se llega a este punto de expansión máxima, se ha formado un cuasivacío dentro de la burbuja. Esto se debe a que su volumen ha crecido mucho, pero el número de moléculas dentro de ella no ha cambiado. La presión atmosférica, sin embargo, aún actúa sobre el exterior de la burbuja. La diferencia de presión entre el interior y el exterior conduce a un colapso o derrumbamiento catastrófico. La bur-

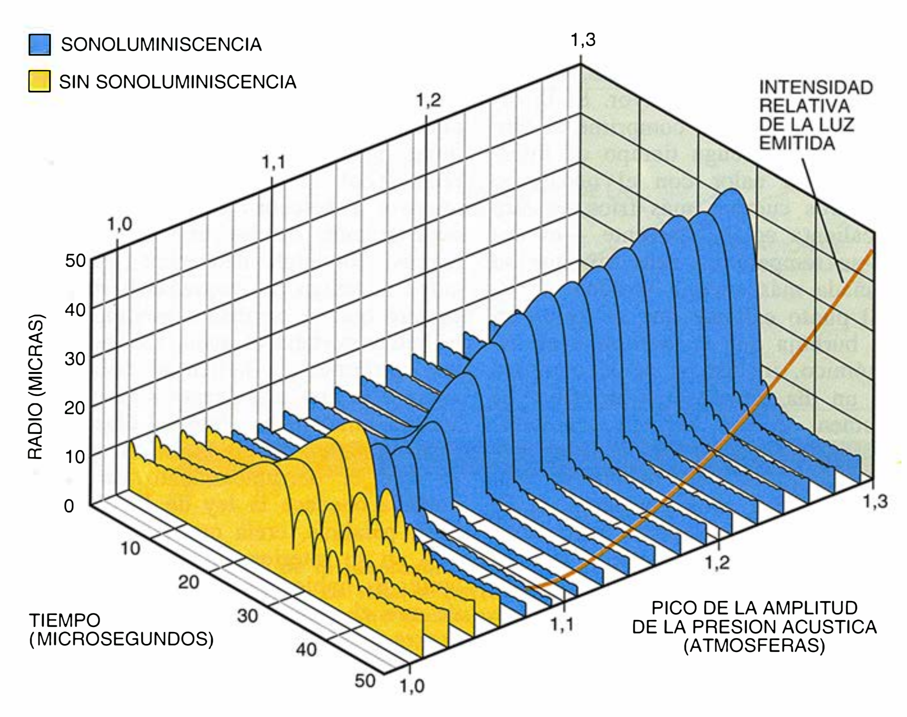


3. AL DERRUMBARSE, la burbuja se calienta por etapas. Se produce un incremento de presión cuando una onda sonora hace contraer la burbuja (*1*). A medida que las paredes se derrumban a velocidades supersónicas, se propagan ondas de choque hacia el centro de la burbuja (*2*). El choque calienta más el interior. Aún se genera más calor cuando las ondas de sonido caen al centro (*3*) y entonces estallan hacia fuera (*4*).

buja mengua de un diámetro máximo de 50 micras a un tamaño de unas 0,5 micras. En ese punto, la superficie de la burbuja deja de precipitarse hacia adentro, como si hubiera topado súbitamente con una pared. La fuerza repulsiva entre los átomos y moléculas del gas impide que la burbuja mengüe más. (Decimos que, en este punto, el tamaño de la burbuja lo determinan las fuerzas de van der Waals del núcleo duro de su contenido.) El destello de luz se produce cuando la burbuja se desacelera dejando atrás su radio mínimo. Tras la emisión de luz, el tamaño de la burbuja rebota elásticamente unas cuantas veces hasta que queda inerte en el agua, a la espera de la siguiente ración de sonido.

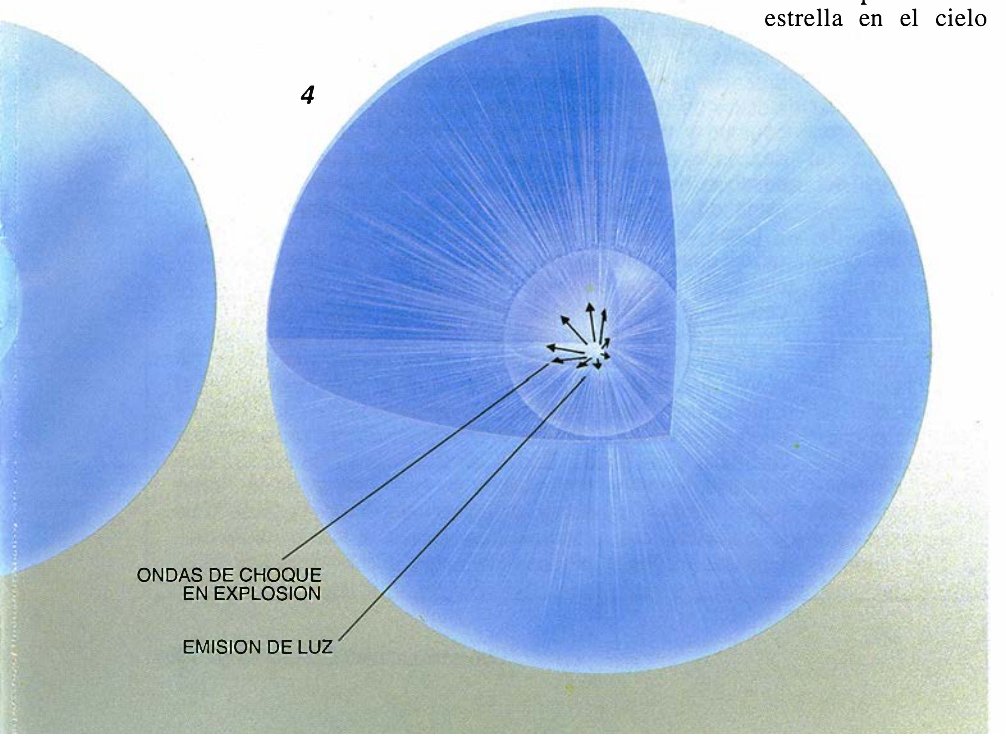
Aunque los experimentos pueden medir el tamaño de la burbuja, no hay teoría que explique de dónde salen esos radios concretos. El tamaño de la burbuja depende de la cantidad de gas atrapado en su interior. Löfstedt y yo estudiamos el mecanismo por el que el gas disuelto en el agua que circunda la burbuja se difunde en ésta. Cuando la burbuja se agranda, la presión interior es pequeña; por tanto, el gas fluye hacia dentro desde el fluido circundante. Cuando la burbuja es pequeña, ocurre lo contrario. El balance entre las moléculas de aire que entran y salen determina el tamaño medio de la molécula.

El radio de una molécula movida por un campo sonoro débil parece seguir las predicciones de este modelo. Pero si aplicamos el mismo razonamiento a una burbuja emisora de luz creada por un campo de gran amplitud, salta una contradicción con los datos. Debería verse que el radio medio de la burbuja crece constantemente a medida que el sonido se hace más fuerte. En la práctica, sin embargo, esta relación tiene una discontinuidad insólita justo cuando surge la luminiscencia: el radio medio disminuye de pronto, por un momento; más allá de ese punto aumenta de nuevo con la amplitud del sonido. Ha de haber algún mecanismo de flujo de masa nuevo (y por ahora desconocido) que determine el estado de sonoluminiscencia.



4. LA TRANSICION A LA SONOLUMINISCENCIA ocurre cuando el nivel sonoro alcanza un estado crítico. El radio promedio de una burbuja aumenta cuando lo hace la amplitud acústica. Al nivel donde empieza la sonoluminiscencia, el radio, de pronto, se reduce. No se conoce el mecanismo que se esconde tras esta transición.

A simple vista, el tenue resplandor azul de la burbuja sonoluminiscente parece una estrella en el cielo nocturno. En 1991, Robert A. Hiller determinó qué parte de esta luz radiada cae en la zona visible del espectro. Halló que en el espectro hay, literalmente, más de lo que el ojo ve. Los resultados mostraron que la burbuja emite más luz morada que roja y más ultravioleta que morada. No pudimos seguir el espectro más allá de energías fotónicas de 6 electronvolts, que corresponden a una longitud de onda ultravioleta de 0,2 micras, pues por encima de esas energías la luz no puede propagarse por el agua. (Por la misma razón, tuvimos que construir nuestra vasija de cuarzo, en vez de con puro vidrio, que bloquea la luz ultravioleta.) Una energía de seis electronvolts corresponde a una temperatura de 72.000 kelvins; el interior de la burbuja es ardiente, sin duda.



Que una burbuja de gas que se derrumba se caliente mucho puede explicarse con una experiencia común para quienes viven en el sur de California o en los Alpes. Sufren un tiempo especialmente tórrido cuando el viento sopla desde alturas mayores a menores. En el sur de California se da una "Santa Ana" cuando el aire de las tierras altas del desierto se calienta quince grados al soplar sobre el valle de Los Angeles. El súbito incremento de temperatura se debe al efecto que la atmósfera produce en la masa de aire del desierto conforme ésta cae unos mil quinien-

tos metros mientras avanza hacia el océano. A altitudes menores, la presión barométrica es mayor. Si la diferencia de presión comprime el aire antes de que tenga tiempo de intercambiar su calor con el océano o con otros cuerpos más fríos, el aire se calienta adiabáticamente —es decir, su temperatura sube sin que se le añada más energía térmica.

El punto caliente que se forma en una burbuja que se derrumba es astronómico, incluso si se le compara con un día tórrido de California. El volumen de una burbuja sonoluminiscente cae en un factor de un millón cuando su radio disminuye cien veces. En los años cincuenta, B. E. Noltingk y E. A. Neppiras calcularon que la resultante compresión adiabática del interior de la burbuja conduce a una temperatura por encima de 10.000 kelvins y presiones superiores a las 10.000 atmósferas. (La superficie de la burbuja no se vaporiza quizá porque ese rápido ritmo de presurización y calentamiento sucede en el interior profundo de la burbuja.)

Si Lord Rayleigh hubiese vivido en el sur de California, quizá su experiencia con el clima le habría llevado a predecir la sonoluminiscencia en la investigación sobre las burbujas que efectuó en 1917. La Marina Real le contrató para que ayudase a descubrir las causas de la degeneración de las hélices de los barcos. Rayleigh determinó que la culpa la tenían las pequeñas burbujas de aire que se creaban a medida que la hélice cortaba el agua. Las burbujas corroerían la hélice al colapsar sobre ella con una fuerza superior a 10.000 atmósferas. Pero al describir el movimiento de las burbujas, supuso que el derrumbamiento de una burbuja obedece la ley de Boyle: en otras palabras, creía que la temperatura en su interior permanecía constante. Si hubiese caído en la cuenta de que el colapso es tan rápido que ocurre adiabáticamente, habría predicho seguramente la producción de grandes temperaturas y la emisión de luz asociada a ellas.

¿Cómo podría generar luz la alta temperatura, exactamente? Según quienes investigan la sonoluminiscencia y la sonoquímica, basta la energía del derrumbamiento para romper dentro de las burbujas las moléculas. Las moléculas disociadas emiten luz cuando se recombinan. Este efecto, al que se llama quimioluminiscencia, se comunicó por primera vez en 1952; lo hizo Virginia F. Griffing, de la Universidad Católica. Acompaña a la cavitación fugaz, y se ha empleado para iniciar procesos químicos inusuales. Un ejemplo es la fabricación de hierro amorfo por Kenneth S. Suslick, de la Universidad de Illinois.

Aunque el calentamiento adiabático de una burbuja que se derrumba proporciona un mecanismo impresionante de concentración de energía, no puede ser la respuesta única o completa. Ese calentamiento solo no podría generar el espectro, en muy buena medida ultravioleta, que hemos observado. Por tanto, tiene que haber una etapa adicional de amplificación de la energía. Barber y yo dedujimos un mecanismo verosímil. Caímos en la cuenta de que las velocidades supersónicas de la burbuja

Ondas de choque en las burbujas

En el pasado, los investigadores que estudiaban la sonoluminiscencia y la sonoquímica asociaron las nubes fugaces de burbujas de cavitación con los puntos calientes que se forman dentro de cada burbuja. En este modelo tradicional, la energía concentrada por el colapso de las burbujas crea moléculas disociadas que emiten luz al recombinarse.

Sin embargo, la doctrina prevaleciente sobre la cavitación fugaz no es capaz de explicar el espectro fuertemente ultravioleta que emite una sola burbuja sincronizada con el campo sonoro. Nuestras mediciones indican que el interior de la burbuja adquiere una temperatura considerablemente mayor que 10.000 kelvins. A este valor se puede llegar si el derrumbamiento de una sola burbuja sincronizada es tan rápido y simétrico que propague una onda de choque esférica hacia su interior. A medida que la onda de choque de radio R_S se precipitase hacia el centro, su amplitud y su velocidad crecerían. En este caso, las ecuaciones de la hidrodinámica toman la forma

$$R_S = At^b$$

donde A es una constante, el tiempo t se mide a partir del momento en que $R_S = 0$, y b es 0,7 para el aire.

Cada onda de choque tiene asociado un número de Mach, que representa la razón entre la velocidad de choque y la velocidad ambiente del sonido. La temperatura tras un frente de choque es mayor que ante él; la razón de estas temperaturas es proporcional al cuadrado del número de Mach.

Para una burbuja de aire en implosión, el número de Mach se acerca a infinito conforme el frente de choque se va aproximando al punto focal, lo que quiere decir que se produce un calentamiento enorme. Además, cuando el choque da en el centro y explota hacia fuera, las moléculas que habían ido quedando por detrás del frente lo tienen de pronto otra vez de cara. Las moléculas calientes son golpeadas por segunda vez, y sus temperaturas suben en otro factor del cuadrado del número de Mach.

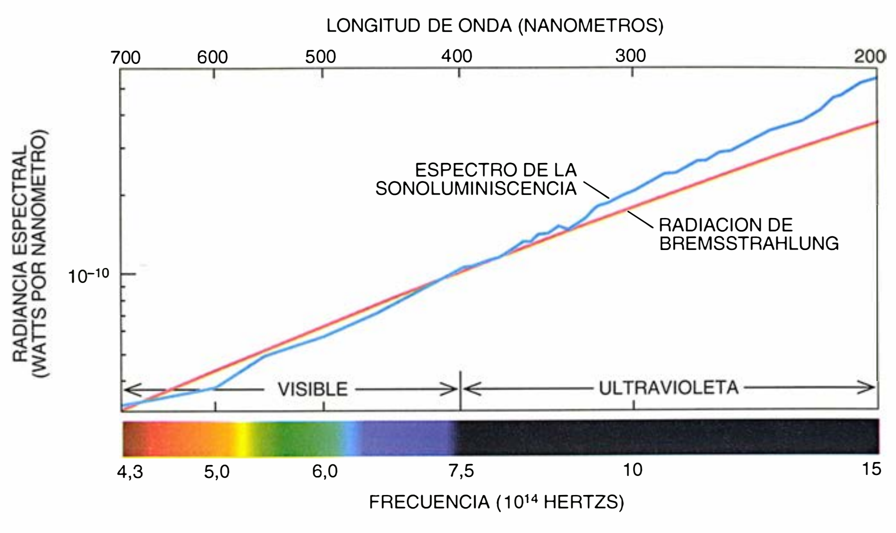
Las temperaturas que se pueden alcanzar según este modelo matemático son, pues, inimaginablemente altas. En realidad, la estabilidad del frente de choque les pone un límite. En el modelo de la onda de choque, la sonoluminiscencia depende de que el frente siga siendo esférico hasta que su radio mida alrededor de 0,1 micras.

Los frentes de choque esféricos desempeñaron un papel importante en el diseño de las armas nucleares. El físico británico Geoffrey I. Taylor consiguió una calibración no autorizada de las primeras pruebas de bombas de hidrógeno mediante fotografías y la fórmula pertinente para los choques explosivos. En el futuro, el conocimiento que tengamos de la manera en que un campo sonoro luminiscente genera un derrumbamiento tan perfectamente esférico podría ayudar a los investigadores a preparar versiones mejoradas de la fusión por confinamiento inercial. En este proceso de fusión, unos láseres enormes provocan la implosión de una pequeña bola que contiene una mezcla de deuterio y tritio, isótopos del hidrógeno. La implosión esférica es la clave para llegar a las temperaturas y densidades que hacen falta para conseguir la fusión de esos núcleos de hidrógeno y obtener helio y neutrones.

Cabe una posibilidad, muy conjetural, de que la comparación entre la fusión por confinamiento y la sonoluminiscencia revele entre ellas una similaridad más profunda. Si el choque sonoluminiscente permaneciese estable hasta el radio increíblemente pequeño de 10 nanómetros, esa minúscula región tomaría temperaturas apropiadas para la fusión. No cuesta imaginar muchos efectos que se interpondrían en el camino hacia ese resultado: la inestabilidad de la onda de choque, la difusión térmica y la atenuación por radiación, por citar sólo unos pocos. Dadas las limitaciones de los modelos actuales, estamos convencidos de que esta cuestión no se puede resolver mediante simulaciones por computador. Sólo los experimentos futuros podrán decir si el interior de la burbuja llega a estar tan caliente como el interior del Sol.

en colapso propagarían ondas de choque hacia el interior de la burbuja. Aunque las fuerzas que unas moléculas de gas ejercen sobre otras detengan el movimiento de la burbuja, la onda de choque seguirá internándose y concentrando aún más la energía del derrumbamiento.

Paul H. Roberts y Cheng-Chin Wu también se apercibieron de la importancia potencial de las ondas de choque en la sonoluminiscencia. Calcularon la magnitud de la concentración. Basándose en una solución obtenida en los años cuarenta por Karl G. Guderley, mostraron que el derrumbamiento de la burbuja propagaría dentro de la burbuja una onda de choque que se iría haciendo más fuerte a medida que el choque se precipitase hacia el centro. La alta temperatura y la presión asociadas a este frente aumentan aún más cuando el choque convergente estalla hacia fuera.



5. EL ESPECTRO de la sonoluminiscencia muestra que la mayor parte de la luz emitida es ultravioleta. La señal se parece mucho a la radiación de *bremsstrahlung*, es decir, a la luz que emite un plasma a 100.000 kelvins.

Los frentes de choque tienden a sufrir inestabilidades que arrugan sus superficies, lo que limita el alcance de la implosión. Si el frente de choque en movimiento hacia dentro impulsado por la burbuja permanece intacto hasta un radio de 0,1 micras del centro de ésta, la temperatura en sus proximidades será de 100.000 kelvins. Este calor viene a ser el que se necesita para el espectro marcadamente ultravioleta que observamos. Si la onda de choque sobrevive hasta llegar a unos 20 nanómetros, la temperatura alcanzará un millón de kelvins, lo bastante caliente para que se produzcan rayos X blandos (de una longitud de onda relativamente larga). Esos fotones no se propagan por el agua, así que no sabemos si los hay o no. Quizá parezca que la posibilidad de obtener rayos X débiles con el sonido es muy forzada; yo mismo soy escéptico al respecto.

Aunque el mecanismo de la sonoluminiscencia de una sola burbuja resulta difícil de explicar, no lo es producir el fenómeno y modificarlo. Pese a tratarse de un fenómeno tenaz, es muy sensible a parámetros experimentales controlables, como la intensidad del sonido y la temperatura del agua. Por ejemplo, la cantidad de luz emitida por cada destello aumenta en un factor de 200 cuando la temperatura cae de 35 a 0 grados centígrados. A 0 grados, la burbuja rinde unos 10 millones de fotones por destello.

La sensibilidad a la temperatura sugería que podríamos aprender más acerca de la sonoluminiscencia si alterásemos otras magnitudes. Intentamos encontrar la sonoluminiscencia de una sola burbuja en líquidos que no fueran el agua; fracasamos. Como no podíamos cambiar de líquido impulsor, probamos a cambiar el gas de la burbuja. Esta modificación requería desgasificar el agua exponiéndola al vacío —porque esto le extrae el aire disuelto. A continuación disolvíamos en el agua otros gases de nuestras elección. Claro está, este proceso ha de realizarse en un sistema hermético. Hiller, que construyó el aparato, empezó por usarlo para generar burbujas de nitrógeno puro. Preveía que sus propiedades serían similares a las del aire, que en un 80 por ciento es nitrógeno.

Para nuestra sorpresa, las burbujas de nitrógeno puro apenas produjeron luz. Por tanto, esperamos que el oxígeno nos dejase asombrados. Pero, de nuevo, hallamos que las burbujas de oxígeno puro eran muy poco luminosas. Igualmente, la mezcla de 80 partes de nitrógeno y 20 de oxígeno resultó ser un emisor débil. ¡Y lo mismo el gas de un recipiente de aire líquido! Buscamos nuestro estúpido error ansiosamente.

En realidad, las mediciones estaban bien hechas. El aire es, en un uno por ciento, argón que se elimina del aire líquido comercial. Al devolvérselo, la intensidad de la luz creció. También funcionaron el helio y el xenón, si bien cada gas noble produce un espectro propio. Parece que la clave de la sonoluminiscencia estriba en una pequeña impureza gaseosa de alrededor de un uno por ciento. Aún no sabemos por qué es ésa la cantidad óptima.

En vista de nuestros resultados experimentales, ¿qué sabemos de la sonoluminiscencia? Antes que nada y sobre todo, que nos las vemos con un campo sonoro "virtuoso", capaz de colocar una burbuja de gas justo en el lugar donde debe estar para actuar sobre ella simétricamente y con la máxima fuerza. La teoría de una compresión adiabática seguida de una onda de choque que se precipita hacia el centro ofrece un cuadro atractivo que está sirviendo para guiar la investigación.

Este modelo de trabajo es todavía provisional; quedan demasiadas incógnitas por explicar. Entre ellas, el tamaño de la burbuja, el papel de los gases inertes y el mecanismo de la emisión de luz. Y lo que es más importante, ni la teoría ni el experimento han podido determinar el límite de concentración de la energía al que se puede llegar. Seguramente, el mecanismo es el menos lineal de los sistemas de la naturaleza; sin embargo, cabe controlarlo y dejarlo libre de caos. El efecto es tan tenaz y al mismo tiempo tan sensible, que en cuanto cambiamos un parámetro damos siempre con una física nueva.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OBSERVATION OF SYNCHRONOUS PICOSECOND SONOLUMINISCENCE. Bradley P. Barber y Seth J. Putterman, en *Nature*, vol. 352, n.º 6333, págs. 318-323; 1991.

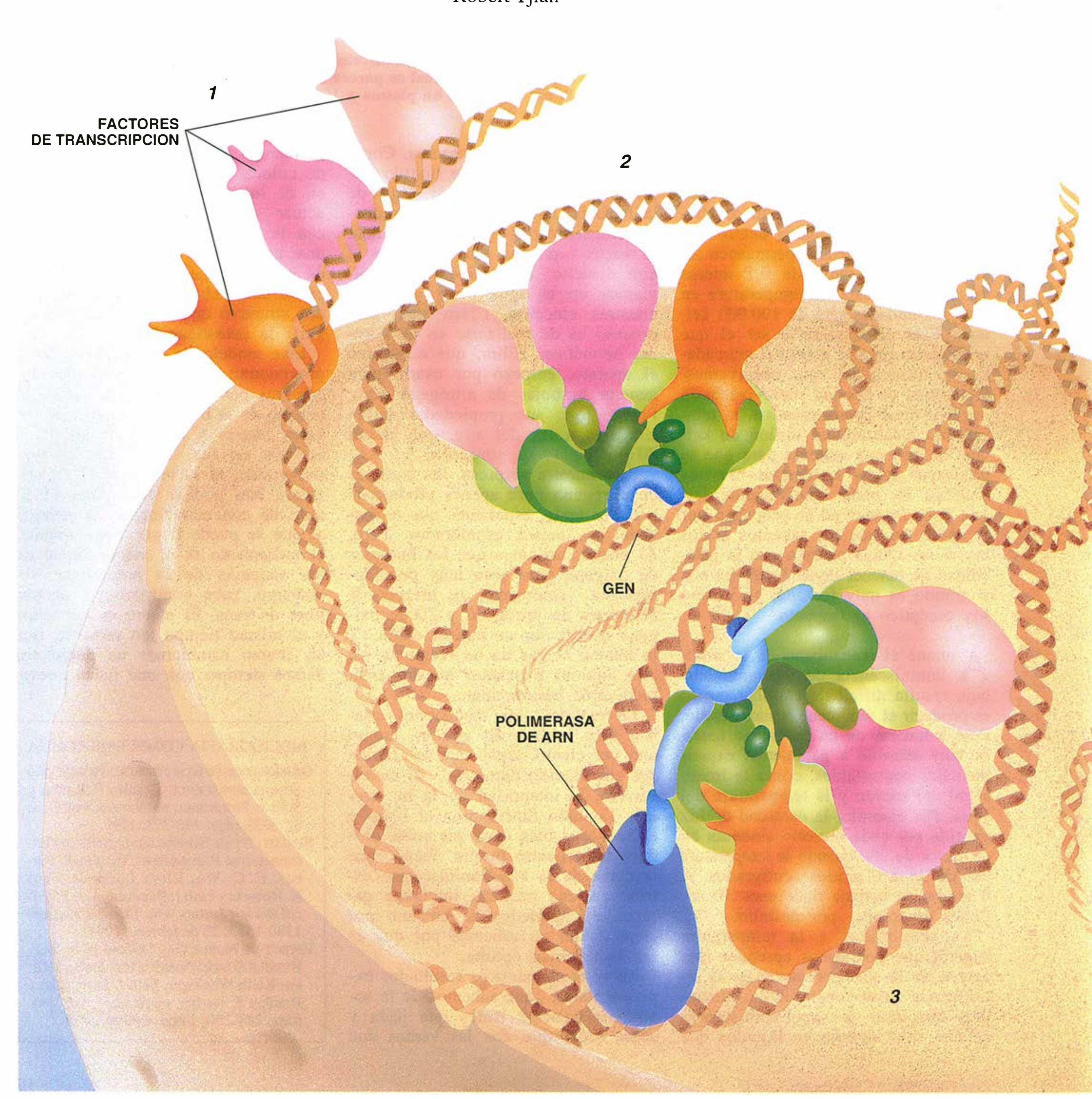
SENSITIVITY OF SONOLUMINISCENCE TO EXPERIMENTAL PARAMETERS. Bradley P. Barber, C. C. Wu, Ritva Löfstedt, Paul H. Roberts y Seth J. Putterman, en *Physical Review Letters*, vol. 72, n.º 9, páginas 1380-1383; 28 de febrero, 1994.

EFFECT OF NOBLE GAS DOPING IN SINGLE-BUBBLE SONOLUMINISCENCE. Robert Hiller, Keith Weninger, Seth J. Putterman y Bradley P. Barber, en *Science*, vol. 266, págs. 248-250; 14 de octubre, 1994.

Mecanismo molecular del control génico

Las actividades de nuestros genes están rigurosamente reguladas por elaborados complejos de proteínas que se ensamblan en el ADN. Cualquier perturbación en el proceso de ensamblado puede ser causa de enfermedades

Robert Tjian

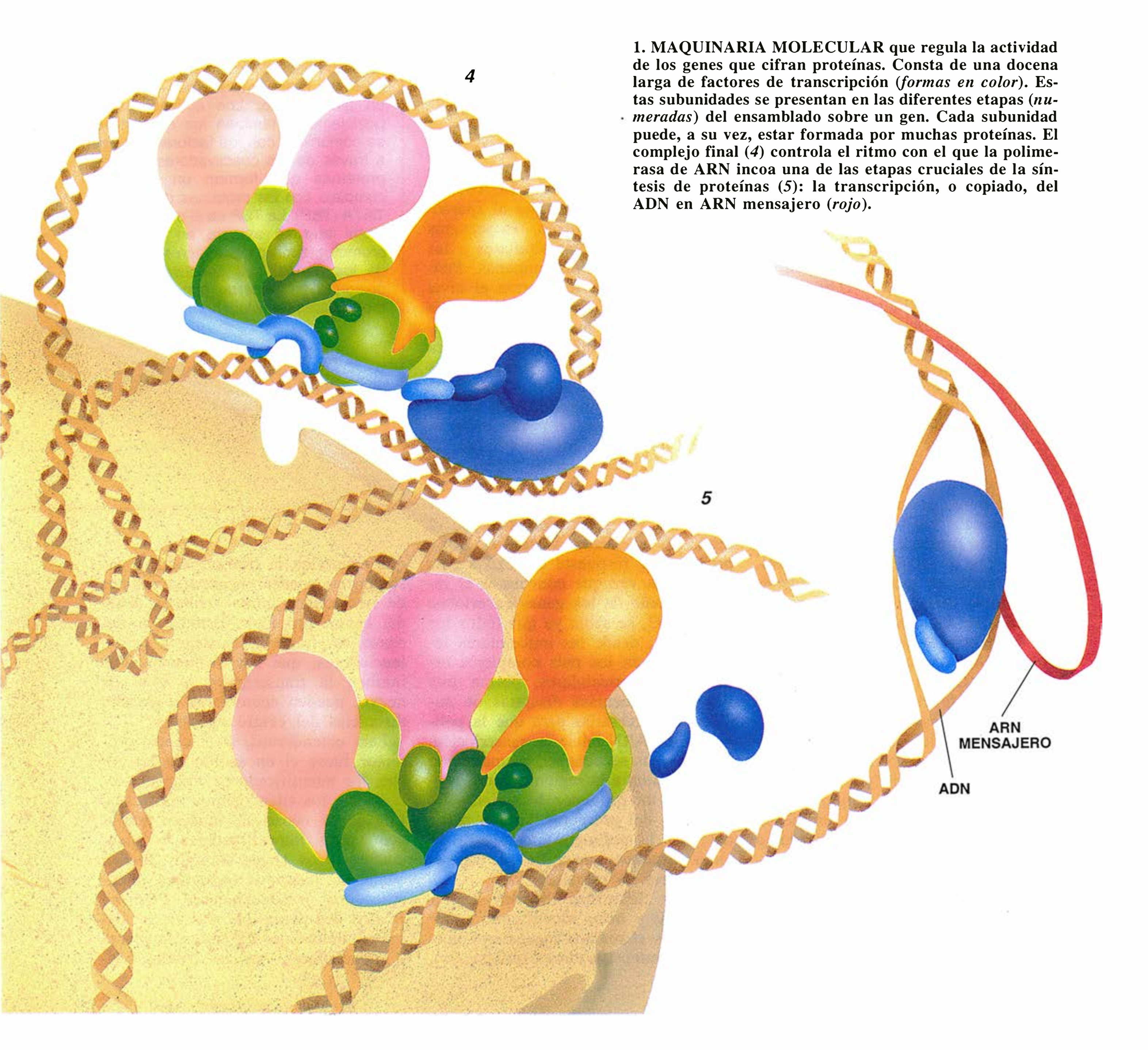


El asma, el cáncer, las cardiopatías, los trastornos inmunitarios y las infecciones víricas son enfermedades que, a primera vista, tienen poco en común. Sólo a primera vista. En última instancia, todas se producen por defecto o por exceso de una o varias proteínas, que son las moléculas que llevan a cabo la mayoría de las reacciones que se producen en el cuerpo. Esta circunstancia ha dado un empuje definitivo a las investigaciones que tienen como objetivo el conocimiento y la manipulación de la maquinaria que regula un paso esencial en la síntesis de proteínas: la transcripción de los genes. Para sintetizar una proteína, el gen que especifica su composición debe transcribirse, copiarse, de ADN en moléculas de ARN mensajero, que posteriormente sirven de molde para la síntesis proteica.

Mucho antes de que la terapia se convirtiera en objetivo, la transcripción había cautivado el interés de los científicos que buscaban desentrañar los mecanismos que regulan este proceso, en la esperanza de que aclarase algunos puntos del misterio de la vida. Todas las células del cuerpo portan el mismo genoma, esto es, los aproximadamente 150.000 genes que constituyen el patrimonio genético de un ser humano. ¿Cómo a partir de una célula, el huevo fecundado, se origina esa miríada de tipos celulares, cada uno de los cuales utiliza una porción diferente del total de genes para producir mezclas diferentes de proteínas? Y una vez formado el cuerpo, ¿cómo consiguen las células aumentar y disminuir las cantidades de proteínas que fabrican, en respuesta a sus propias necesidades y las del organismo en general?

Para responder a estas preguntas y diseñar drogas capaces de modular la transcripción, había que conocer el funcionamiento de la maquinaria que controla la lectura del código genético en la célula humana. Tras 25 años de investigaciones, la estructura global de este aparato empieza a vislum-

ROBERT TJIAN enseña biología celular y molecular en la Universidad de California, en Berkeley, desde 1979.



1. MAQUINARIA MOLECULAR que regula la actividad de los genes que cifran proteínas. Consta de una docena larga de factores de transcripción (*formas en color*). Estas subunidades se presentan en las diferentes etapas (*numeradas*) del ensamblado sobre un gen. Cada subunidad puede, a su vez, estar formada por muchas proteínas. El complejo final (*4*) controla el ritmo con el que la polimerasa de ARN incoa una de las etapas cruciales de la síntesis de proteínas (*5*): la transcripción, o copiado, del ADN en ARN mensajero (*rojo*).

brarse con nitidez. Los trabajos de mi laboratorio, en la Universidad de California en Berkeley, y de otras instituciones, han revelado que una parte de la maquinaria que dirige la transcripción de la mayoría, si no todos, los genes humanos, consta de unas 50 proteínas distintas. Esas proteínas deben ensamblarse en un apretado complejo con el ADN, antes de que una enzima especial, la polimerasa de ARN, pueda empezar a copiar el ADN en ARN mensajero. Todos esos componentes se pueden ya mezclar en el tubo de ensayo para conseguir una maquinaria transcripcional operativa. Existen, además, otras proteínas que se encajan en determinados sitios de esta compleja maquinaria, y la "programan", indicando qué genes hay que transcribir y con qué celeridad. Los puntos cruciales de tales instrucciones también empiezan a revelársenos.

A finales de los setenta, empezamos, en Berkeley, a trabajar con genes humanos. En esa época se sabía muy poco sobre la maquinaria transcripcional de nuestras células. Pero ya se tenía una visión bastante clara de la transcripción en procariotas (bacterias y otros organismos unicelulares primitivos que carecen de núcleo definido). Estos conocimientos adquiridos facilitaron bastante los estudios con células humanas y otros eucariotas (nucleados), y ayudaron a definir características de la transcripción extrapolables a la mayoría de los organismos.

Las investigaciones con bacterias demostraron que los genes están divididos en dos regiones principales, de función distinta. Una de ellas, la región cifrada, determina el orden que deben seguir los aminoácidos para formar una proteína. Ese orden viene dictado por la secuencia de nucleótidos presente en una de las cadenas de la doble hélice de ADN. Los nucleótidos se distinguen unos de otros por la base nitrogenada que portan: adenina (*A*), timina (*T*), citosina (*C*) o guanina (*G*). La otra región del gen cumple una función reguladora: controla el ritmo con el que la polimerasa de ARN debe transcribir la región cifrada en ARN mensajero.

En bacterias, como en la mayoría de los procariotas, la región reguladora, denominada promotor, reside en un tramo de nucleótidos localizados a corta distancia (a menudo sólo 10 nucleótidos) curso arriba del sitio donde comienza la región cifrada. Para que la transcripción se produzca de forma adecuada y eficaz, la polimerasa de ARN debe unirse al promotor. Una vez allí, se desliza hacia el inicio de la región cifrada, desde donde viaja sobre el ADN, como un tren sobre la vía, construyendo una réplica en ARN de la secuencia cifrada. Salvo en los genes muy largos, el número de moléculas de ARN que se fabrican en un momento dado depende principalmente del ritmo con el que la polimerasa de ARN se une al promotor e inicia la transcripción.

Pero la polimerasa de ARN es una molécula muy promiscua, incapaz de distinguir entre un promotor y otra secuencia de ADN. Para que la enzima se dirija hacia los promotores de genes específicos, las bacterias producen ciertas proteínas, los factores sigma, que se unen a la polimerasa de ARN. Los complejos resultantes reconocen secuencias de nucleótidos específicas en el promotor, y se unen a ellas. De ese modo, los factores sigma programan la polimerasa de ARN y consiguen que ésta se engarce sólo en secuencias promotoras.

Los factores sigma desempeñan, por tanto, un papel decisivo en la activación diferencial de los genes bacterianos. Sabedores de ello, cuando nos decidimos a investigar el aparato transcripcional humano, empezamos por buscar moléculas similares a las sigma en las células humanas. Pero no valoramos suficientemente el nivel de complejidad hacia el que había evolucionado la maquinaria encargada de extraer la información genética de nuestros genomas. Pronto fuimos conscientes de la posible ausencia de factores sigma humanos, o de que, si existían, no tenían por qué tener la misma forma que los bacterianos.

Si no existen factores sigma simples en eucariotas, ¿cómo aseguran estas células que la polimerasa de ARN transcriba los genes correctos, en el momento adecuado y con el ritmo preciso? La respuesta empezó a perfilarse una vez que conocimos el insólito diseño de los genes eucariotas.

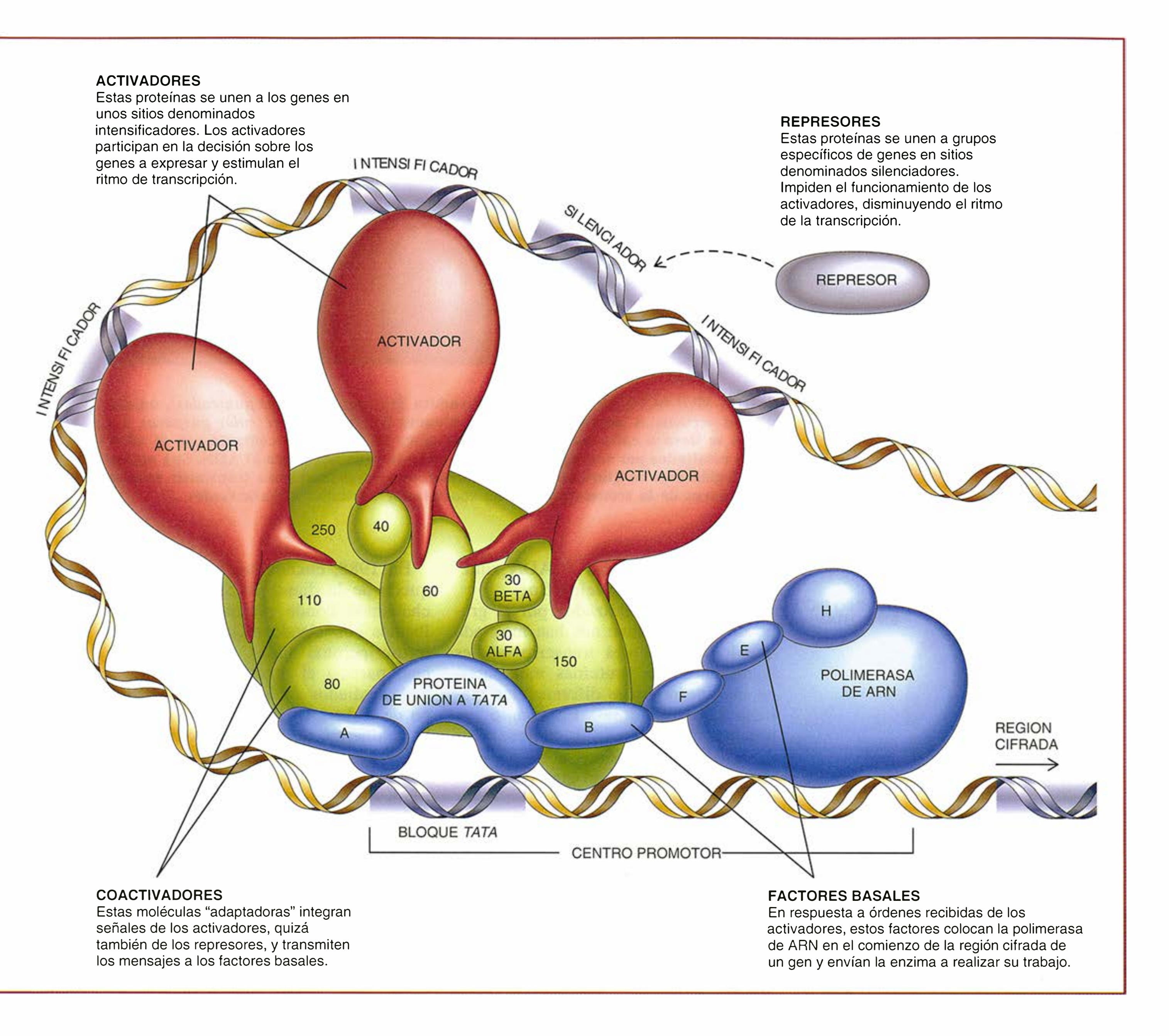
En 1983, se sabía ya que todos los eucariotas, desde las unicelulares levaduras hasta los más complejos organismos pluricelulares, portan tres tipos de secuencias discretas de nucleótidos, necesarias para que la polimerasa de ARN inicie la transcripción. Una de esas secuencias, normalmente muy próxima a la región cifrada, opera como un promotor bacteriano. Es el centro del promotor, sitio a partir del cual la polimerasa comienza su tarea. Muchos genes tienen centros promotores de ese tipo.

Walter Schaffner, Steven Lanier McKnight y otros identificaron, además, unos elementos reguladores nuevos, los intensificadores (*enhancers*), que estimulan la transcripción. Estas secuencias pueden encontrarse a miles de nucleótidos curso arriba o abajo del centro promotor. Estudios posteriores revelaron la existencia de silenciadores, que son secuencias que inhiben la transcripción y que, de nuevo, pueden encontrarse a grandes distancias del centro promotor.

Para entendernos, si el centro promotor fuese el encendido de un coche, los intensificadores serían el acelerador y los silenciadores los frenos. Los genes eucariotas pueden contar con varios intensificadores y silenciadores; dos genes distintos pueden compartir idénticos elementos intensificadores o silenciadores. Pero no existen dos genes que posean la misma combinación de intensificadores y silenciadores. Así, las células con-

Anatomía del mecanismo de transcripción

El aparato molecular que controla la transcripción en las células humanas consta de cuatro tipos de componentes. Los factores basales (*figuras azules, abajo*), designados con una sola letra, son esenciales para la transcripción, pero no pueden incrementar o disminuir su ritmo, tarea que está encomendada a moléculas reguladoras: activadores (*rojo*) o represores (*gris*), que pueden variar de un gen a otro. Los activadores, y posiblemente también los represores, se comunican con los factores basales a través de los coactivadores (*verde*), proteínas que forman un apretado complejo con las proteínas de unión a *TATA* (TBP). La TBP es el primer factor basal que se asienta en el centro promotor, zona de la región reguladora de los genes. Los coactivadores se designan de acuerdo con sus pesos moleculares (en kilodalton).



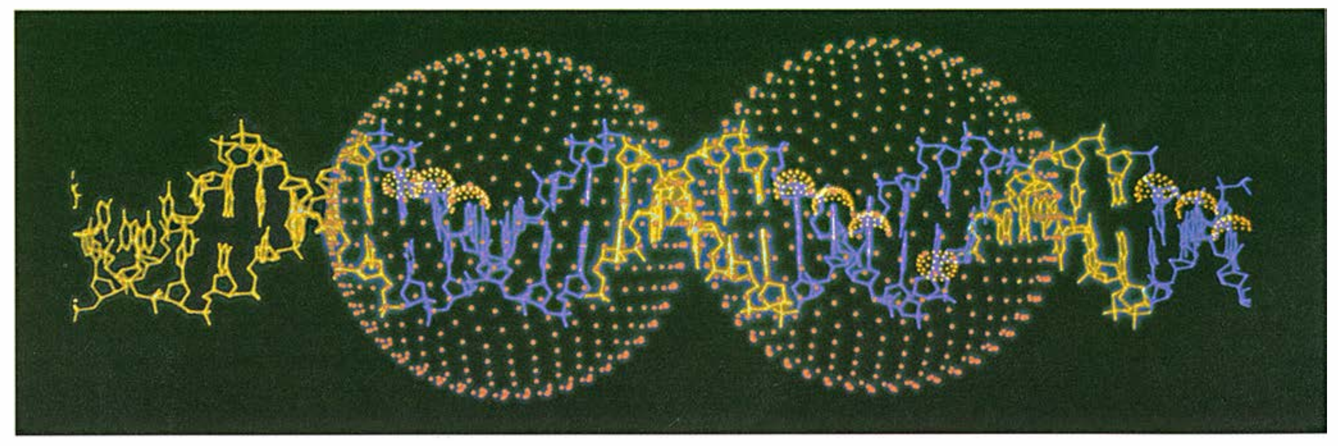
trolan la transcripción de cada gen individualmente.

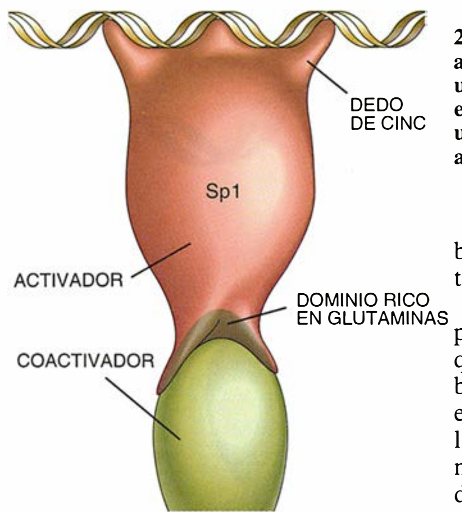
El descubrimiento de esos elementos llevó a dos conclusiones relacionadas y sorprendentes. Era evidente que los intensificadores y silenciadores no podían, por sí solos, controlar la actividad de la polimerasa de ARN. Más bien parecían ser los sitios de "anclaje" de una familia de proteínas. Las proteínas que se uniesen a intensificadores y silenciadores, que ahora se denominan activadores y represores, respectivamente, enviarían a la polimerasa de ARN mensajes de estimulación o represión, directa o indirectamente (es decir, pisarían el acelerador o el freno). En buena lógica, el ritmo de transcripción de un gen dependería, pues, de la actividad conjunta de todas las proteínas —o factores de transcripción— unidas a los diversos elementos reguladores.

Se trataba de explicar por qué las proteínas que se unen a secuencias de ADN situadas muy lejos del centro promotor de un gen podían influir en la transcripción de dicho gen. Lo mismo que otros laboratorios, abordamos el problema intentando aislar factores de transcripción humanos; hasta entonces no se había aislado ninguno (salvo la propia polimerasa de ARN). Suponíamos que una vez que hubiésemos purificado algunos de esos factores, podríamos adentrarnos en las claves de su funcionamiento.

Puesto que muchas proteínas que se unen al ADN no intervienen en la lectura de los genes, el de buscar factores de transcripción por el criterio de pescar proteínas nucleares capaces de unirse al ADN tampoco era el procedimiento más adecuado. Mi grupo adoptó una estrategia más selectiva, buscando proteínas que *in vitro* se uniesen al ADN y estimulasen la transcripción.

En 1982, William S. Dynan determinó que un componente de cierta mezcla de proteínas nucleares cumplía todos los requisitos de un factor transcripcional. Se unía a un elemento regulador común a ciertos genes, denominado bloque *GC* por su abundancia en esos nucleótidos. Lo más importante, no obstante, era que, cuando se añadía a una preparación de proteínas nucleares, entre ellas la polimerasa de ARN, la sustancia sólo estimulaba la transcripción de genes que portaban bloques *GC*. Habíamos, pues, identi-





2. DOS MOLECULAS de proteína activadora Sp1 (*par de esferas punteadas*), unidas a unas secuencias intensificadoras, los bloques *GC* (*regiones de color púrpura*). La unión se lleva a cabo mediante dedos de cinc; los puntos de contacto con el ADN están resaltados por semiesferas de color naranja. Una vez unida al ADN, Sp1 utiliza una región rica en glutamina (*color marrón, en el esquema*) para transmitir señales activadoras de la transcripción a un coactivador específico (*figura verde*).

ficado el primer factor transcripcional humano capaz de reconocer una secuencia reguladora específica. Lo llamamos SP1 (*s*pecific *p*rotein 1).

Nos pusimos a purificar la molécula. Había que vencer una dificultad característica: los factores de transcripción se dan en pequeñísimas cantidades dentro de la célula; por lo común, un factor particular puede representar la cienmilésima parte del total de proteínas de una célula humana. En 1985, James T. Kadonaga encontró una forma de salvar esa dificultad técnica, introduciendo una poderosa herramienta, que se utiliza desde entonces para purificar incontables factores de transcripción y otras proteínas de unión a ADN, que normalmente se hallan en cantidades ínfimas.

Como Sp1 reconocía bloques *GC* selectivamente, Kadonaga sintetizó moléculas de ADN que sólo contenían secuencias de ese tipo, y las "pegó" por procedimientos químicos a unas bolitas sólidas. A continuación, pasó una mezcla compleja de proteínas nucleares humanas por el ADN, sabedor de que sólo la Sp1 quedaría unida a dicho ADN. Y de esa forma, separando las proteínas que se habían quedado pegadas al ADN sintético, purificó la proteína Sp1.

Los estudios realizados por el grupo de Mark Ptashne nos han mostrado que los reguladores transcripcionales bacterianos son proteínas modulares, en las que regiones diferenciales realizan tareas distintas. En cuanto conocimos la secuencia de aminoácidos de Sp1, nos aprestamos a buscar esos módulos; observamos que al menos había dos interesantes.

Un extremo de la molécula contenía una región capaz de plegarse formando tres dedos de cinc, que son estructuras en las que cierta parte de la proteína se pliega alrededor de un átomo de cinc. Esos dedos constituyen los "garfios" que utilizan muchas proteínas activadoras para unirse al ADN. Sp1 era la segunda proteína en la que se encontraban esos motivos. El equipo de Aaron Klug había descubierto, muy poco tiempo antes, dedos de cinc en un factor de transcripción de rana.

El otro extremo de Sp1 contenía un dominio formado por dos segmentos discretos, ricos en el aminoácido glutamina. Sospechábamos, fundados en un importante descubrimiento, que esa región intervenía en la transcripción. En experimentos *in vitro*, las moléculas Sp1 mutantes que carecían de ese dominio se trababan perfectamente con el ADN, pero no estimulaban la transcripción génica. Tal hallazgo indicaba que Sp1 no afectaba a la transcripción en virtud de la simple unión al ADN; el segmento rico en glutaminas, ahora denominado activador, interaccionaba con alguna otra parte de la maquinaria transcripcional. Pero, ¿qué parte?

En 1988, cuando iniciamos la búsqueda de la diana de Sp1, ya sospechábamos dónde podría encontrarse. Ibamos conociendo mejor el complejo transcripcional basal, una parte del cual parecía el objetivo verosímil.

A mediados de los ochenta, el grupo de Robert G. Roeder demostró que la polimerasa de ARN no podía transcribir genes eucariotas si previamente no se habían ensamblado en el centro promotor otros factores de transcripción, ahora llamados factores basales. Durante ese decenio, el laboratorio de Roeder y otros habían identificado al menos seis de esos factores esenciales: A, B, D, E, F y H.

En el tubo de ensayo, esta colección de factores permitía a la polimerasa transcribir el gen correspondiente a un ritmo basal, bajo e invariante, pero sin posibilidad de modulación. Cuando mi grupo mezcló los componentes del complejo (incluyendo la polimerasa de ARN) con un gen que tenía un bloque *GC*, obteníamos un nivel de transcripción bajo y constante. Sólo si añadíamos Sp1 a la mezcla observábamos un notable incremento de la transcripción.

A finales de los ochenta ya se sabía que las células humanas alojaban al menos dos tipos de factores de transcripción. Los factores basales se requieren para la iniciación de la transcripción en todos los genes; otras proteínas —activadores y represores— dictan el ritmo de inicio de la transcripción por el complejo basal. A genes diferentes les corresponden controles por combinaciones distintas de activadores y represores. Nos parece, sin embargo, que, *in vivo*, es muy raro que el complejo basal se ensamble

espontáneamente. La mayoría de las veces las células dependen de activadores para iniciar su ensamblado.

Los resultados sugerían que el dominio de Sp1 rico en glutaminas estimulaba la transcripción interaccionando con un factor basal. En particular, sospechábamos que Sp1 entraba en contacto con el factor D, y facilitaba su unión al promotor. Nos centramos en esa subunidad porque Phillip A. Sharp y Stephen Buratowski habían demostrado que dicho factor llegaba al centro promotor antes que los demás factores basales y permitía el ensamblado de la maquinaria basal. En realidad, el factor D es el único componente basal capaz de reconocer ADN. Se une selectivamente a una secuencia denominada bloque *TATA*, que hay en los centros promotores de muchos genes eucariotas.

Para seguir nuestra hipótesis, necesitábamos ahondar en la composición del factor D, que creíamos se trataba de una proteína solitaria. No éramos los únicos interesados en desentrañar su estructura. Comenzó la carrera hacia la purificación del factor. Su aislamiento a partir de células humanas resultó más difícil de lo previsto. Muchos grupos probaron suerte con las levaduras. Por fin, en 1989, varios laboratorios, independientemente, consiguieron aislar una proteína de levaduras con las propiedades esperadas para el factor D. La proteína, conocida como TBP (de *TATA* *b*inding *p*rotein) reconocía al bloque *TATA*, se unía a él selectivamente y determinaba un nivel bajo de transcripción cuando se unía al centro promotor mediante la polimerasa de ARN y otros componentes de la maquinaria basal.

Convencidos de que la proteína TBP era el propio factor D, nos dispusimos a comprobarlo. Confirmado ello con los experimentos que realizamos, había que determinar exactamente qué regiones de la TBP interaccionaban con Sp1 y otros reguladores. Muy pronto nos hallaríamos a medio camino entre la frustración y la gloria.

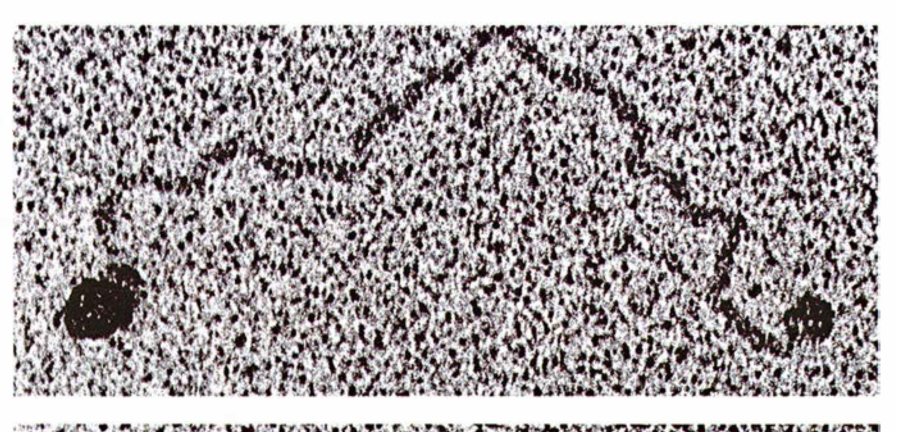
B. Franklin Pugh utilizó moléculas purificadas de proteína TBP, en vez de las preparaciones de factor D sin purificar. Comprobó que la sustitución no distorsionaba la transcripción basal. Sin embargo, para nuestra sorpresa y consternación, también comprobó que Sp1 dejaba de activar la maquinaria basal. Había que concluir, por tanto, que el factor D y la proteína TBP no eran equivalentes; el factor D constaba de proteína TBP y otras subunidades. (Hoy sabemos que muchos factores de transcripción contienen más de una proteína.) Según todos los indicios, esas subunidades no se necesitaban para las operaciones que realizaba la maquinaria basal, pero eran esenciales para que los activadores regulasen tales mecanismos.

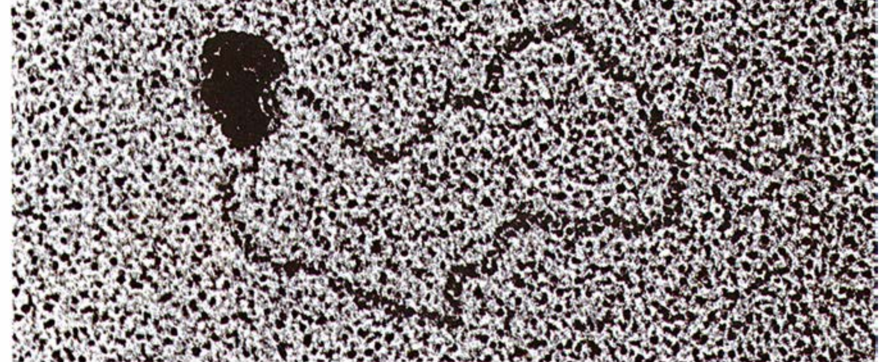
En otras palabras, esos componentes adicionales no eran activadores, pues no se unían a secuencias específicas de ADN. Ni tampoco eran factores basales, ya que en su ausencia se alcanzaban niveles bajos y no regulados de transcripción. Parecían constituir una tercera clase de factor transcripcional, denominados hoy coactivadores. Más tarde, propusimos que los coactivadores, y no la proteína TBP, eran las dianas de los dominios de unión a proteínas de los activadores. Sospechábamos que los activadores tendrían que unirse a coactivadores específicos para acelerar el ritmo de activación de la polimerasa de ARN por el complejo basal.

Pensábamos que debía ser así porque no cabía imaginar que una sola proteína (TBP) tuviera suficientes sitios de unión como para acomodar a todos los activadores fabricados por las células humanas. Pero si los coactivadores ligados a la TBP presentasen muchos dominios de unión, sumados todos ellos podrían proporcionar los sitios de anclaje necesarios para transmitir los mensajes de los cientos o miles de activadores a la maquinaria de transcripción.

A Pugh se le ocurrió la idea de que los coactivadores podían funcionar como tales moléculas adaptadoras. Sus datos me convencieron de la verosimilitud de su hipótesis, aunque no todos en nuestro laboratorio pensaban lo mismo. Nuestras reuniones semanales de principios de los noventa fueron testigos habituales de acaloradas discusiones. No era raro que, cuando se presentaba a otros investigadores del campo el concepto de coactivador, también se mostrasen escépticos. Esta reacción a un resultado inesperado y complicado quedaba probablemente justificada, ya que nuestros datos no eran incuestionables. Ni siquiera habíamos conseguido todavía aislar un solo coactivador.

Para terminar de convencernos de que estábamos en lo cierto, debíamos diseñar un procedimiento experimental que estableciese sin ambigüedades que los coactivadores existían y operaban como los transmisores que habíamos imaginado. Los dos años siguientes a la propuesta de la hipó-



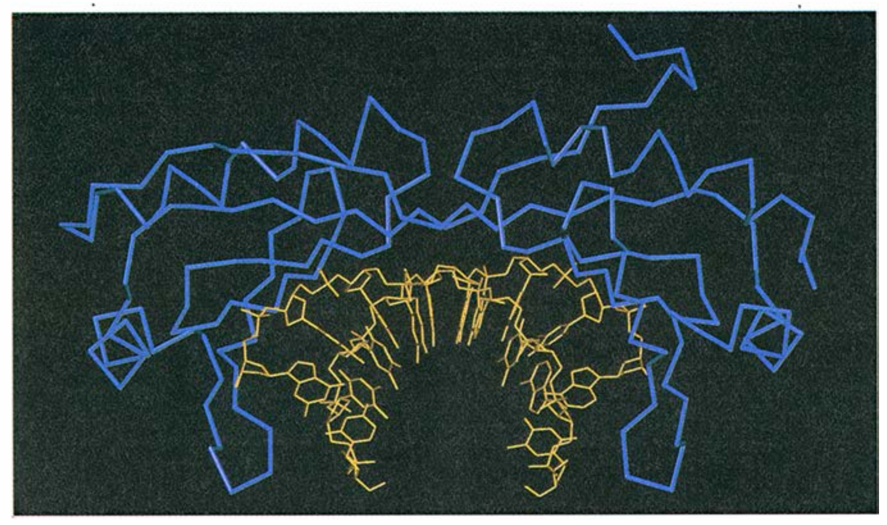


3. MUTUA COMUNICACION ENTRE LOS ACTIVADORES, amén de la señalada con el ADN o con los coactivadores; se demostró en un experimento con Sp1. En la micrografía se muestran copias de la proteína (*manchas oscuras*) unidas al ADN por bloques *GC* situados en los extremos de la molécula. Una vez allí, entrarán en mutuo contacto y darán origen a un bucle de ADN (*abajo*).

tesis del coactivador por Pugh los dedicamos a purificar un complejo intacto y funcional que contuviese la TBP y todos los demás constituyentes asociados al factor D. Atravesamos momentos amargos, en los que parecía que la más que impopular hipótesis del coactivador podía basarse en errores de nuestra propia investigación.

Pero el descubrimiento llegó. En 1991, Brian D. Dynlacht, Timothy Hoey, Naoko Tanese y Robert Weinzierl, de nuestro laboratorio, encontraron una forma ingeniosa de aislar copias puras del factor D. Posteriores análisis bioquímicos revelaron que, además de la TBP, la unidad completa incluía 8 proteínas hasta entonces desconocidas. Puesto que carecíamos todavía de pruebas de que esas proteínas operasen como coactivadores, las denominamos genéricamente TAF, o factores asociados a la TBP.

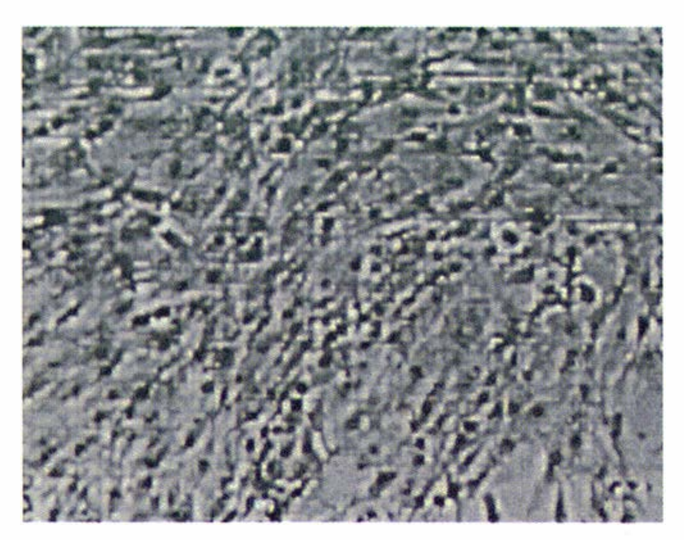
Nos convencimos de que los TAF enviaban señales moleculares desde los activadores hasta el aparato transcripcional basal después de separar las proteínas del TBP y hacer otros experimentos. En ese contexto, demostramos que, en mezclas de activador Sp1, factores basales y polimerasa de ARN, sólo se estimulaba la producción de ARN mensajero de un gen que contenía un bloque *GC* cuando también se añadían los TAF. Posteriormente, Jin-Long Chen mezcló en un tubo de ensayo TBP purificada, los ocho TAF aislados, un gen humano y el resto de la maquinaria basal de transcripción. El conjunto de proteínas se ensamblaba en el gen y respondía ante diversos tipos de proteínas activadoras. Al poco tiempo, demostramos que esos activadores actuaban uniéndose directamente a ciertos TAF. En conjunto, los coactivadores del factor D vienen a constituir una suerte de unidad central de procesamiento que integra señales reguladoras emitidas por activadores que están unidos al ADN.

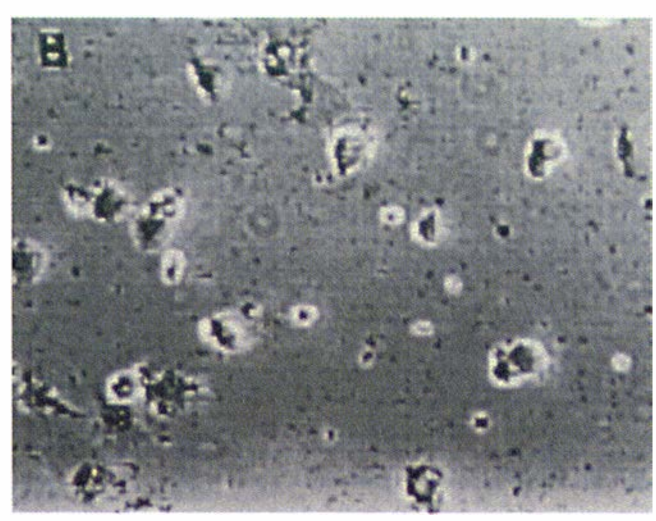


4. LA PROTEINA que se une a *TATA* (*azul*) es una molécula en forma de silla de montar, casi simétrica. Su cara inferior monta sobre el ADN (*amarillo*) y parece que lo dobla. Este pliegue puede facilitar el ensamblado del complejo que inicia la transcripción. Se admite que los coactivadores, no ilustrados aquí, se unen a la cara superior.

Los complejos formados por activadores, coactivadores y maquinaria basal representan el equivalente humano de los factores sigma. Además, atraen a la polimerasa hacia genes específicos y con un ritmo muy concreto. En cierto modo, los complejos pueden considerarse factores sigma formados por muchas subunidades. Pruebas recientes abonan la posibilidad de que nos hallemos ante una forma universal de regulación génica en eucariotas. Esos estudios confirman que en levaduras también existen coactivadores y que el factor D consta de muchas subunidades en hongos, igual que en el hombre.

Sin embargo, aunque los resultados sean satisfactorios, no acaban de explicar de qué manera la unión de los activadores a los intensificadores y a los coactivadores influye en el ritmo de transcripción de los genes *in vivo* por parte de la polimerasa de ARN. Puede que la unión de los activadores a los intensificadores haga que el ADN se pliegue de forma que acerque a los intensificadores entre sí y a éstos con el centro promotor. Esta disposición puede facilitar que los activadores (solos o en concierto con otros) se acoplen con los coactivadores y determinen así el anclaje del factor D en el promotor. Ello posibilitaría, a su vez, el ensamblado de todo el complejo basal. La





5. CELULAS CULTIVADAS (*izquierda*), que detienen su proliferación y mueren (*derecha*) cuando se bloquea la síntesis de un coactivador. La muerte se debe a que no pueden producir proteínas necesarias para su supervivencia. Este y otros descubrimientos similares indican que los coactivadores son esenciales para la transcripción de la mayoría de los genes, o tal vez de todos.

formación de este complejo podría cambiar la configuración del ADN subyacente y hacer que la polimerasa de ARN avance hacia la región cifrada que debe transcribir.

Sobre el funcionamiento de los represores sabemos menos. No obstante, muchos pensamos que los represores podrían también unirse a veces a los coactivadores. Esta unión inhibiría la transcripción, impidiendo que los activadores se engarcen en los sitios habituales sobre los coactivadores. En otras ocasiones, los represores podrían "puentear" la maquinaria basal, bloqueando la transcripción al impedir que los activadores conecten con los intensificadores.



6. UNA DE LAS MUJERES MAS ALTAS DEL MUNDO mide casi 2,32 metros. La raíz de la alteración reside en su hipófisis, que produce un exceso de hormona de crecimiento. Los investigadores esperan tratar ésta y otras muchas enfermedades incrementando o disminuyendo la transcripción de genes específicos.

Pese a las lagunas en el razonamiento, podemos ya esbozar una respuesta a la pregunta de por qué células distintas fabrican mezclas diferentes de proteínas durante el desarrollo embrionario y en los organismos maduros. Para que un gen se transcriba a un ritmo mensurable se necesita la presencia de los activadores adecuados y que éstos eludan el efecto inhibidor de los represores. Las células fabrican proteínas diferentes porque portan mezclas distintas de activadores y represores. La pregunta a plantear ahora es cómo decide la célula qué factores transcripcionales debe producir en primer lugar. Pero ésa es otra historia en la que también se están ya consiguiendo algunos progresos.

¿Cómo podemos aprovechar estos nuevos conocimientos sobre la regulación génica para desarrollar medicamentos que combatan enfermedades graves motivadas por la transcripción excesiva o inadecuada de un gen? En teoría, impidiendo que los activadores correspondientes se unan a los intensificadores o coactivadores se debería poder disminuir un ritmo de transcripción excesivo. Por su parte, estabilizando la maquinaria transcripcional de un gen deberíamos poder contrarrestar una indeseada transcripción débil.

El bloqueo podría conseguirse colocando un "tapón" molecular en un activador, para impedir que interaccione con un coactivador, o atrayendo al activador hacia un señuelo que imite al coactivador. La estabilización de un complejo podría conseguirse desplegando moléculas que refuercen las interacciones entre activadores y ADN, o entre activadores y coactivadores. Se trata de estrategias todavía lejanas, pero quizá resulte interesante considerar una muestra de sus posible aplicaciones.

Tomemos, por ejemplo, el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH), la causa del sida. Para reproducirse en células humanas, el VIH necesita un factor de transcripción propio, denominado *TAT*, que estimule la transcripción de los genes víricos. Si hubiese algún agente inhibidor que reconociese el *TAT*, e ignorase a los factores de transcripción humanos, se podría detener la replicación del virus sin afectar la producción de proteínas del paciente.

A la inversa, el tratamiento de algunas enfermedades, por ejemplo la hipercolesterolemia, podría basarse en la estimulación de la transcripción de ciertos genes. La hipercolesterolemia incrementa el riesgo de cardiopatías. El colesterol se acumula en la sangre hasta niveles destructivos cuando la proteína de baja densidad (LDL), el colesterol malo, no se elimina bien. En teoría, la enfermedad podría corregirse activando la transcripción del gen para el receptor de la LDL en células hepáticas. Este receptor ayuda a limpiar la sangre de LDL. Esperamos que muy pronto se compruebe la viabilidad de la idea: Michael S. Brown y Joseph L. Goldstein están estudiando a fondo los componentes moleculares de la transcripción del gen del receptor.

Hasta hace muy poco, nadie había dedicado mucho esfuerzo a buscar moléculas pequeñas, productos naturales o cualquier otro compuesto capaz de modular la transcripción. A pesar de ello, existen en el mercado varios medicamentos, encontrados por azar, que actúan alterando la actividad transcripcional. Uno de ellos, el RU486 (la píldora abortiva), reprime la función de ciertos receptores de esteroides, una clase de activadores que dirigen el desarrollo embrionario. De forma similar, el inmunosupresor ciclosporina y la FK506 bloquean la transcripción de un gen cuyo producto proteínico es necesario para ciertas células del sistema inmune. Estas drogas, no obstante, actúan indirectamente. Activan una enzima que impide el funcionamiento de un factor de transcripción sobre ese gen.

Con el tiempo se irán identificando las combinaciones exactas de factores transcripcionales que regulan la expresión de genes concretos. Y los diseñadores de medicamentos utilizarán probablemente esa información para desarrollar sofisticados compuestos capaces de combatir distintas enfermedades.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TRANSCRIPTIONAL REGULATION IN MAMMALIAN CELLS BY SEQUENCE-SPECIFIC DNA BINDING PROTEINS. Pamela J. Mitchell y Robert Tjian en *Science*, vol. 245, páginas 371-378, 28 de julio de 1989.

EUKARYOTIC COACTIVATORS ASSOCIATED WITH THE *TATA* BOX BINDING PROTEIN. G. Gill y R. Tjian en *Current Opinion in Genetics and Development*, vol. 2, n.º 2, páginas 236-242; abril, 1992.

TRANSCRIPTIONAL ACTIVATION: A COMPLEX PUZZLE WITH FEW EASY PIECES. R. Tjian y T. Maniatis en *Cell*, vol. 77, n.º 1, páginas 5-8, 8 de abril de 1994.

Philip Yam

WALTER H. MUNK *o cómo oír la temperatura del océano*

Walter H. Munk se va desatando el nudo de la corbata. "Acabo de dar una conferencia", ofrece como excusa. El estilo informal del sur de California parece imperar en el despacho de Munk, donde el rumor de las olas y la brisa marina relajan al más inquieto de los visitantes.

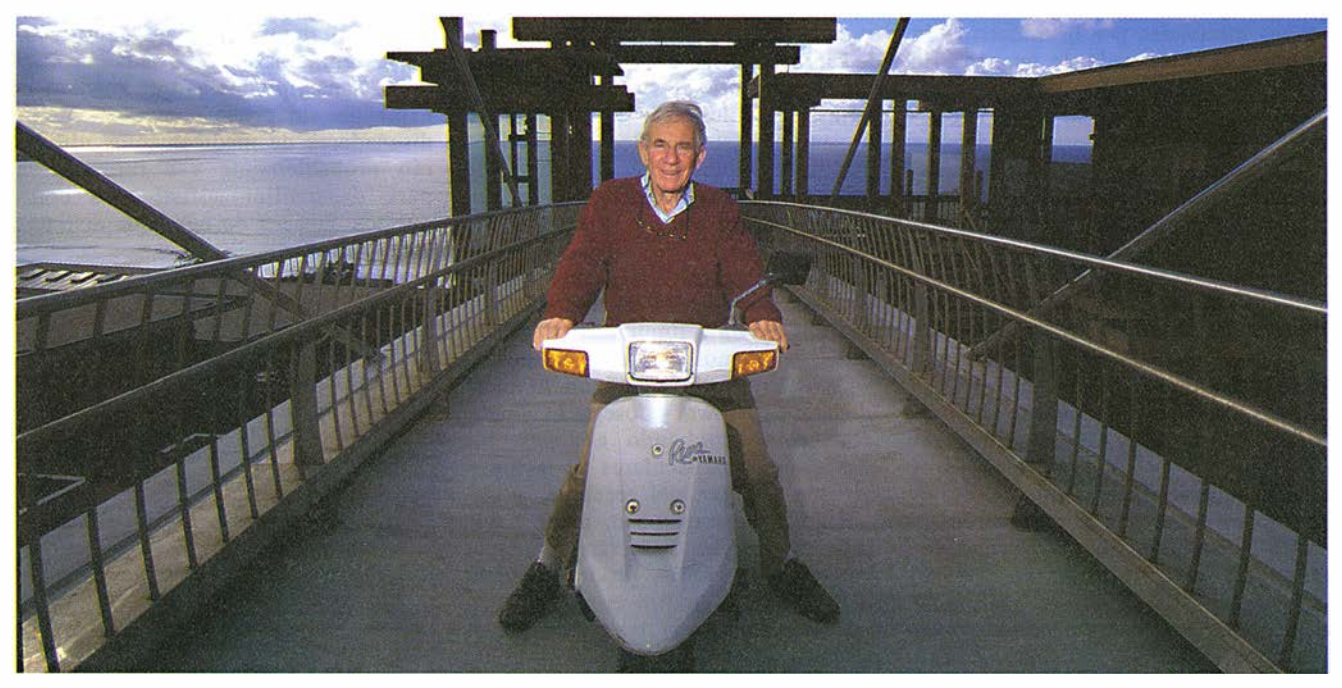
A pesar de la calma que le rodea, Munk, de sorprendente agilidad a sus 77 años, se lanza de lleno a su tarea. Lo lleva haciendo durante más de medio siglo en la Institución Scripps de Oceanografía en La Jolla. Es cortés y de sonrisa fácil; y me invita a dar una vuelta a mitad de la entrevista, deseoso de mostrarme su instituto y el nuevo puente colgante que lo conecta con las nuevas instalaciones de la Scripps. El y su esposa Judith, que es arquitecta, colaboraron en el diseño del centro, cuyos edificios se levantan entre las laderas irregulares de la costa.

Pero su medio es el mar. Mientras saboreo el té que ha preparado, Munk repasa el correo electrónico. "Oímos ayer que la Marina se propone cerrar su estación de escucha en las Bermudas", me informa con su ligero acento austríaco. El desmantelamiento del puesto —creado para descubrir la presencia de submarinos soviéticos— se llevaría a cabo en menos de un par de semanas, y Munk y sus colegas se han puesto rápidamente en acción. "Nuestro plan es convencer a la Marina de que nos lo ceda", comenta. Los científicos podrían escuchar los terremotos submarinos y seguir los movimientos migratorios de los mamíferos acuáticos.

La perseverancia de Munk es proverbial. Sus colaboradores lo definen como un fenicio contumaz o un vendedor inasequible al desaliento, en el mejor sentido de la expresión. Su entusiasmo irresistible y contagioso por lo que lleva entre manos ha conquistado a muchos investigadores y burócratas de la financiación. De hecho, se dice que Munk es uno de los oceanógrafos más influyentes. "Dígalo esta noche delante de mi mujer", me reta Munk, "y le responderá con una palabra que no me atrevo a pronunciar".

"Lo que le convierte en un científico fuera de serie —apunta Carl Wunsch, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, que trabaja con él desde hace tiempo— es su habilidad para ver más allá de las matemáticas, hasta dar con el trasfondo físico." Las investigaciones de Munk le han reportado numerosos galardones y distinciones, entre ellos el Premio Vetlesen, a veces llamado el Nobel de la geología.

Reputación que no le ha servido para detener un inesperado varapalo reciente. Los grupos ecologistas han calificado su última propuesta experimental de letal para los mamíferos acuáticos. Para comprobar algunos modelos climáticos, su equipo de expertos se propone emitir ondas sonoras de baja frecuencia desde Kauai (Hawai) y Point Sur (California). A cierta profundidad del océano, la temperatura y la presión permiten que el sonido viaje durante miles de kilómetros sin atenuación significativa. El sonido viaja más rápido en las aguas cálidas que en las frías, y los cambios de la velocidad media se pueden medir durante muchos años seguidos. El objetivo del proyecto, llamado termometría acústica del cli-



EL OCEANOGRAFO Walter H. Munk vive a caballo entre el mar y la tierra

ma oceánico (ATOC), es verificar las predicciones de calentamiento global que resultan de algunos modelos climáticos.

Maniobras legales y acciones políticas han retrasado ya el proyecto más de dos años. Los oponentes arguyen que los ruidos podrían resultar dañinos para las ballenas porque trastornarían su sistema de comunicación o las dejaría sordas, matándolas incluso. Munk lo reconoce: "Ciertamente, las ballenas pueden oír a decenas de kilómetros, y esto puede acarrear complicaciones en sus hábitos de apareamiento y de alimentación. Es una preocupación legítima."

Pero una preocupación cuya importancia se ha exagerado, insiste el oceanógrafo. "Todo empezó por un fallo", dice Munk. Un alumno de posdoctorado se equivocó en las unidades. "Transmitiríamos 250 watts de potencia acústica", explica Munk. El estudiante pensó que el nivel era de 250 millones de watts, lo que resultaría fatal para cualquier ser vivo de las cercanías. Un reportaje en *Los Angeles Times* desató la reacción que amenaza el proyecto ATOC.

El revuelo tomó desprevenidos a los investigadores. "Hemos trabajado en esto durante años sin problemas", señala Munk. Una prueba controlada del ATOC en 1991 no reveló ningún peligro. Se realizó en la isla Heard, cerca de la Antártida, al sur del océano Indico. Durante el experimento se emitieron ondas sonoras que se detectaron en todo el mundo, demostrando que la medición acústica de las temperaturas oceánicas era factible. Munk había organizado las cosas de modo que unos biólogos marinos controlaran los efectos que pudiera tener sobre las ballenas. "Fue 1000 veces más alto de lo que queremos hacer ahora, y no causamos ninguna molestia a los mamíferos marinos." Asegura también que hay otras fuentes mucho más perjudiciales. "Es un sonido comparable al de un superpetrolero, y hay un millar de barcos de ésos por el mundo. Y funcionando las 24 horas del día. Ahora hemos propuesto emitir sólo el 2 por ciento del tiempo, de modo que se nos oirá mucho menos que a un superpetrolero."

Parte del problema surge del lenguaje empleado en los dictámenes de impacto ambiental, que indican que el experimento "atentaría" contra cientos de miles de mamíferos. Además de la muerte, esa palabra puede significar cualquier otro cambio de comportamiento. "Si encendemos la fuente y una ballena cambia su rumbo en 10 grados, hemos atentado, por definición", concluye Munk.

Munk nunca imaginó que llegaría a ser oceanógrafo. "De pequeño sólo pensaba en los deportes. No me atraía el estudio." Su formación vienesa comenzó en las finanzas. Su abuelo era un banquero que dejó suficiente dinero como para asegurar la vida de sus hijos y una próspera parentela en Nueva York, donde Munk arribó a la edad de 14 años. "El plan era que yo siguiera sus pasos", recuerda. "Mi madre fue lo suficientemente comprensiva como para prometerme que, si lo probaba en serio durante un par de años y no me gustaba, podría hacer lo que quisiera. Y no me gustó nada. Siempre me aburrieron los bancos. Además, éstos sólo te conceden un préstamo cuando tienes tanto dinero que no lo necesitas."

Harto, Munk decidió alejarse de Nueva York todo lo posible. "Leí los folletos de las distintas universidades del país y me enamoré de esos nombres californianos de origen español tan maravillosos, como Pasadena o Santa Mónica. Y las fotos parecían muy románticas." Acabó en las escaleras del Instituto de Tecnología de California. "Yo era rematadamente ingenuo", confiesa. "No había formalizado la solicitud. Simplemente me presenté y llamé a la puerta del decano. Pensaba que con eso bastaba." Quizá sorprendido por esa candidez, el decano le tomó la prueba de ingreso, que Munk pasó por los pelos.

"Me gusta trabajar en cosas de las que no haya nada publicado, que te las tengas que resolver tú mismo"

Una vez admitido, estudió física aplicada, con la idea de especializarse luego en geofísica. Pero pronto cambió de proyecto. "Tenía una novia que veraneaba con sus abuelos en La Jolla." Munk la siguió hasta allí, y para ganarse la vida trabajaba en Scripps. Las relaciones se rompieron, pero le gustó tanto Scripps que volvió para hacer el doctorado con el oceanógrafo Harald Sverdrup.

Fue durante la Segunda Guerra Mundial cuando Munk comenzó una duradera relación con la Marina. "Me alisté en la Armada convencido de que se acercaba el fin del mundo. Entonces la Marina empezó con la guerra antisubmarina", en la que se hallaban implicados Roger Revelle, antiguo director de Scripps, ya difunto, y Sverdurp. Solicitaron el traslado de Munk para poder trabajar con ellos. Fue una medida providencial. Pocos días después los japoneses atacaron Pearl Harbour. "Mi unidad había sido enviada a Nueva Guinea y fue arrasada", recuerda. Con Sverdrup, Munk predijo que se daría un oleaje favorable que permitiría el desembarco anfibio de los aliados en el noroeste de Africa. Así ocurrió.

Su trabajo militar constituye una mínima parte de sus contribuciones a las ciencias de la tierra. "Ya ve, he ido picoteando aquí y allá", afirma. "Hago algo durante 10 años y luego me paso a otra cosa." Junto con Gordon J. MacDonald, geofísico de la Scripps, explicó en los cincuenta por qué el eje terráqueo se zarandea y por qué la rotación varía ligeramente. En los sesenta demostró que las tormentas de la Antártida dan lugar a los largos y regulares trenes de olas que rompen en el sur de California durante el verano. En el decenio siguiente trabajó con Wunsch desarrollando la tomografía acústica oceánica. La técnica, que hace uso de las ondas sonoras para levantar un mapa tridimensional de las temperaturas y corrientes del océano, le llevó directamente a su interés actual por el clima de los océanos.

"El resultado inevitable es que no hago nada muy bien, porque no trabajo en lo mismo durante mucho tiempo", dice como autocrítica. "No soy muy académico. No me gusta leer. Me gusta trabajar en cosas de las que no haya nada publicado, que te las tengas que resolver tú mismo."

Después de la cena, Judith me enseña lo que se han construido en el jardín trasero: un elegante anfiteatro capaz de acomodar a 100 invitados. Padeció la polio y va en silla de ruedas. "Vivimos muy cerca de Jonas Salk", me explica él, "y le echamos frecuentemente en cara que, si no hubiera sido tan condenadamene perezoso, si hubiera conseguido la cosa esa (la vacuna antipolio de Salk) un par de años antes, Judy no habría acabado así". Munk se ríe y levanta las manos. "Se confiesa culpable."

Aunque no se dedica a la ciencia, Judith ha colaborado en la carrera de Walter —desde el turno de vigilancia de costa a las cuatro de la mañana en las islas Samoa hasta influir en sus opiniones. "Posee un tremendo sentido común", cuenta Munk. "Me dice cuándo hago algo estúpido." Ninguna de las dos hijas del matrimonio ha seguido una especialidad científica tampoco.

Ciencia y sociedad

Paleolítico

Alimentación

No contamos todavía con estudios de síntesis sobre la alimentación de nuestros antepasados prehistóricos de la península Ibérica, lo que no debe sorprendernos. Las investigaciones sólo pueden apoyarse en la arqueología, y resultan imprescindibles los análisis de los restos de flora y fauna hallados para poder obtener tales síntesis por yacimientos y así pasar luego a las de un determinado período y zona geográfica. Pero apenas si han empezado a publicarse los primeros resultados provisionales del examen del polen, los frutos, las conchas y otros restos sólidos.

Tomemos como ejemplo el nordeste peninsular. Tenemos testimonios de que en la dieta humana se incluían grandes mamíferos de clima frío que, a partir del Cuaternario (desde hace 1.800.000 años) van substituyendo a las especies adaptadas a un entorno cálido de la era Terciaria. Se trataba, sin embargo, de un ingrediente esporádico, pues no era fácil su captura con las armas que habían desarrollado.

En la dieta del *Homo sapiens* paleolítico del nordeste peninsular entraban, sobre todo, vegetales y frutos, que completaban con el consumo de hormigas, gusanos, saltamontes, lagartijas y serpientes. Aves y huevos debieron desempeñar también un papel importante, si bien aquí el registro es más imperfecto. El arte parietal nos muestra que la miel debió de recolectarse desde muy pronto.

Sólo a partir del Paleolítico medio, con el conocimiento del fuego, los grandes animales podían sufrir procesos de transformación como el hervido o el asado para facilitar su asimilación. Los yacimientos del macizo del Montgrí (Gerona) nos ilustran sobre cuáles eran estos grandes animales cazados con los útiles líticos disponibles (hachas, raederas, bifaces): ciervos, cabras, rebecos, conejos, jabalíes y, sobre todo, caballos (*Equus cavallus*), lo que revela toda una especialización cinegética de sus habitantes. Aunque más escasos, también mataron asnos (*Equus asinus*), elefantes (*Elephas* sp.), bueyes (*Bos primigenius*) y rinocerontes (*Dicerorhinus* sp.). Cabe presumir que los linces (*Lynx spelea*), panteras (*Panthera pardus*), zorras (*Vulpes vulpes*), osos (*Ursus spelaeus*) y lobos (*Canis lupus*) presentes en las cuevas del Montgrí no fueran sólo cazados por su piel.

Durante el Paleolítico superior, el clima frío provocó la retirada de los bosques en beneficio de los prados y, por consiguiente, de las manadas de herbívoros. En esta época sobresale la caza de caballos y bóvidos. Sin embargo, a fines del Cuaternario, en el período Magdaleniense (entre 15.000 y 10.000), el paso a un clima más templado facilita la expansión de los bosques y, con ellos, la del ciervo, que se convierte en el animal habitual de la dieta.

La cueva de l'Aragó, en Tautavel, a veinte kilómetros de Perpignan (Pirineos Orientales), ha proporcionado a lo largo de treinta años de excavaciones datos importantísimos para conocer la dieta de los grupos humanos que la habitaron de forma esporádica entre hace 690.000 y 35.000 años. Conviene saber que no existen rastros de hogares ni de carbones con una antigüedad superior a 400.000 años. La base de la alimentación de estos grupos fueron los grandes herbívoros, el ciervo en particular (*Cervus elaphus*) y el muflón (*Ovis amon antiqua*), mientras el gamo (*Dama clactionana*) sólo aparece en los niveles más antiguos, antes de los 450.000 años, en los que también es muy abundante el reno. Consumían, asimismo, de forma habitual, carne de caballo y, de manera ocasional, bisonte. Han aparecido en todos los niveles de la cueva huesos dispersos de las dos especies europeas de rinoceronte, de sabana (*Dicerorhinus hemitoecus*) y de Merck (*Dicerorhinus mercki*). Más escasos, casi testimoniales, los huesos de rebeco (*Rubicapra rubicapra*) y de cabra de los Alpes (*Capra ibex*). El jabalí (*Sus scrofa*) sólo se presenta de forma esporádica en los estratos posteriores al 400.000. La cueva de l'Aragó da fe de la práctica de la antropofagia, demostrada por la rotura de los huesos largos de forma voluntaria para extraer la médula.



Excavaciones en la cueva de l'Aragó (sur de Francia)

Parece que la gente que habitó el llano de Tautavel durante el Cuaternario no apreciaba en demasía los peces del Verdouble, que corre al pie de la cueva: hasta el momento no ha aparecido ninguna muestra de su consumo. En general, el pescado no desempeñó un papel importante en las comunidades prehistóricas; los útiles que podrían estar relacionados con la pesca y los escasísimos restos de trucha, anguila o barbo que se han hallado en algunos yacimientos son de fechas relativamente recientes, de hace unos 11.000 años (Roc del Migdia en Vilanova de Sau y Bora Gran d'en

Carreres en Seriñá, ambas en el nordeste español). Sin embargo, la presencia de salmón atlántico en las cuevas de la Albreda y de Reclau Viver, en Seriñá, demuestra que el Mediterráneo era entonces un mar mucho más frío y con menor salinidad que en nuestros días. En todo caso, se trata siempre de peces de río; no parece que los grupos paleolíticos se acerquen demasiado al mar; la propia pesca fluvial podría incluso ser una actividad secundaria.

Aunque el grueso de la documentación científica procede de los restos óseos, hemos de evitar caer en el error de conceder a la carne un papel principal en la dieta prehistórica. Correspondía éste a los vegetales y frutas, que no han dejado rastro en las zonas de habitación. En estos últimos años, los análisis basados en el estudio bioquímico de los huesos humanos (relación entre la cantidad de estroncio y de calcio) permiten saber si la dieta era de base cárnica o vegetal. En el yacimiento epipaleolítico de Roc del Migdia, se han encontrado piñones, avellanas, nueces y bellotas carbonizadas. Con seguridad, aprovecharían también el fruto de especies endémicas: peras, moras, fresas, ciruelas, castañas, frambuesas y aceitunas; en el vecino yacimiento de Cingle Vermell, de unos 10.000 años de antigüedad, se han documentado también las almendras. De todos estos frutos, la bellota debía ser el más importante, cuya harina anticiparía la obtenida de los cereales a partir del Neolítico.

ANNA PUJOL I PUIGVEHÍ

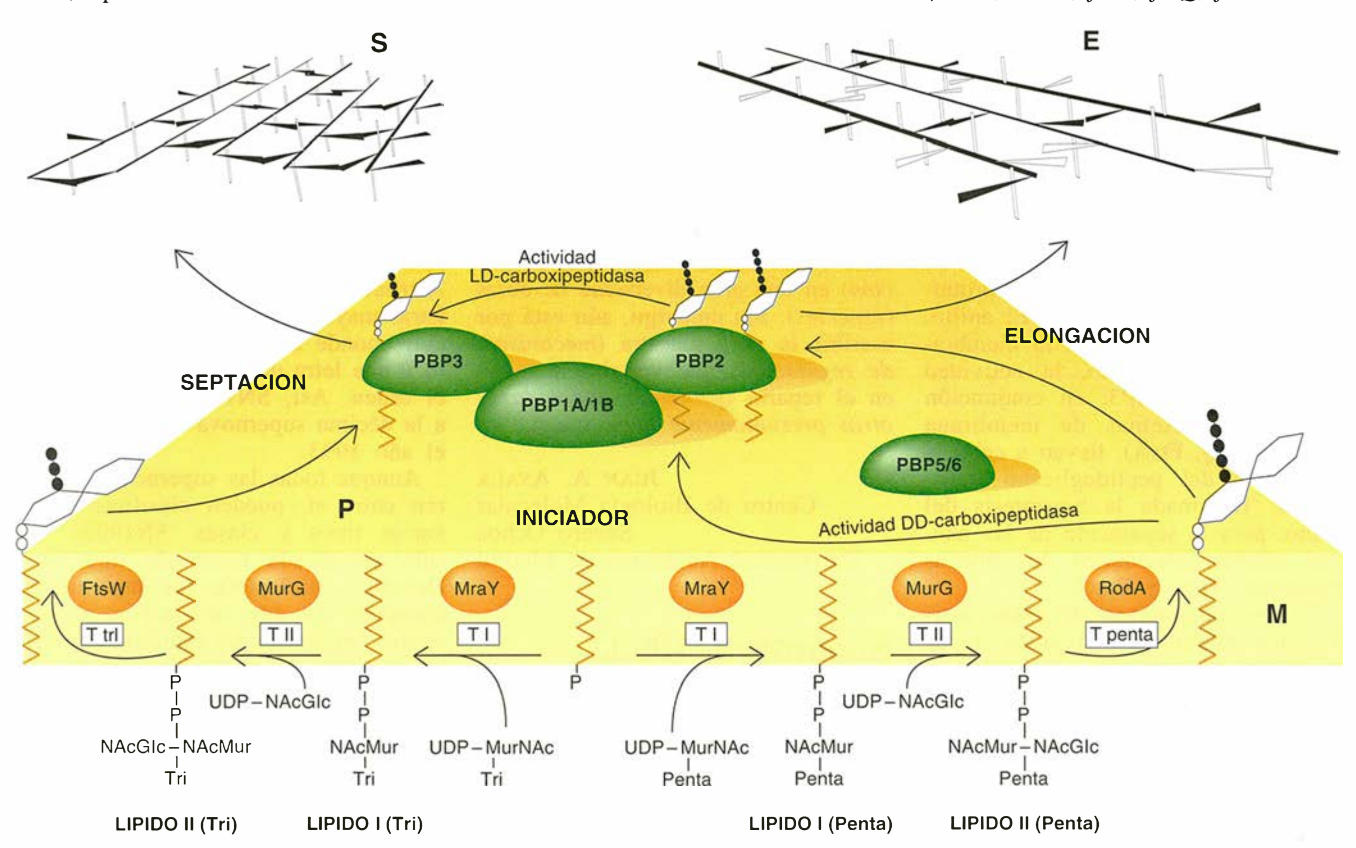
División microbiana

Septosomas

Para su supervivencia, todas las células deben atravesar etapas sucesivas de crecimiento, replicar su material genético y experimentar, por fin, un proceso de división que separa dos células hijas iguales a su progenitora. Este último proceso presenta características similares en todos los seres vivos, desde las arqueobacterias hasta los organismos eucariotas superiores, aunque existen las diferencias obvias según el tipo celular.

El estudio morfológico, bioquímico y genético de la división microbiana se ha centrado, sobre todo, en *Escherichia coli*, enterobacteria que produce el mayor número de infecciones en el mundo debido a la aparición de cepas virulentas. Las bacterias, que carecen de núcleo, poseen, en su envoltura celular, el sáculo; esta estructura macromolecular —un peptidoglicano— les permite mantener la forma y soportar su alta presión osmótica interna. Por lo demás, las bacterias atraviesan para su división etapas bioquímicas y morfogénicas *análogas* a las que sufren las células eucariotas.

Tras la elongación celular y duplicación del material genético, aparece una constricción central. Se separan entonces las células hijas por septación, es decir, por formación de una invaginación de los tres componentes de la envoltura (membrana citoplásmica, sáculo y membrana externa). En este proceso de cambio morfológico y morfogénico están implicados genes de la biosíntesis del sáculo (*ponB*, *pbpB* y *ftsW*) y genes estructurales o reguladores de la división (*mraR*, *mreB*, *ftsA*, *ftsQ*, *ftsZ*, *minC*,



Esquema del proceso de biosíntesis, transporte y ensamblaje de los precursores en el sáculo de Escherichia coli. *Los precursores solubles se integran en la membrana (M) en forma de lípido II(tri) y lípido II(penta) mediante la acción de las enzimas MraY y MurG. El paso de translocación, específico para cada precursor, viene mediado por las proteínas RodA y FtsW. En el espacio periplasmático (P), la acción de las proteínas PBP1A y 1B inician las cadenas; PBP2 usa directamente el sustrato lípido II(penta) para la elongación (E). Una vez localizado el septo, en este punto las actividades DD-carboxipeptidasa de PBP5 y PBP6 y la actividad LD-carboxipeptidasa, o la translocación directa, aportan el substrato específico de PBP3 para septación (S)*

minD y minE). Según parece, los genes *ftsZ*, *mreB* y *ftsW* intervendrían en una fase precoz del proceso de división, a modo de condición para que funcionaran los demás genes y se desarrollaran las etapas siguientes.

Todos los genes mencionados determinan proteínas que se encuentran en la membrana celular formando un complejo septador o septosoma. Aunque no hay pruebas exhaustivas de ello, parece ser que la presencia de una u otra proteína en el complejo depende de la etapa morfológica en que se halle la célula.

¿Cuál es la naturaleza de estas proteínas? ¿Qué función desempeñan? En nuestro laboratorio hemos comprobado la interacción entre la enzima PBP3 (que cataliza la formación del peptidoglicano septal) y las proteínas FtsZ y FtsA. Desde el punto de vista bioquímico, FtsA presenta homología estructural con la familia de proteínas fijadoras de ATP, tales como dnaK y actina, y se ha demostrado su capacidad de fijar ATP y ser fosforilada. FtsZ es una proteína citoplásmica que tiene actividad GTPasa y que depende de la presencia de GTP para ensamblarse en un anillo alrededor del septosoma. La secuencia aminoacídica de esta proteína es homóloga a la tubulina, a la que imita también por su ensamblaje en filamentos, aunque los anticuerpos dirigidos contra una de ellas no muestran reacción cruzada con la otra.

La aparición del anillo de FtsZ sería el iniciador del proceso de septación; bloquean su formación en otros lugares de la célula las proteínas MinC, MinD y MinE. El anillo, al estrangularse, contrae la membrana. En ese momento, la actividad enzimática de PBP3, en conjunción con otras proteínas de membrana (MraR, FtsQ, FtsA), llevan a cabo la formación del peptidoglicano transversal. Terminada la biosíntesis del septo, para la separación de las nuevas células intervienen dos nuevas proteínas: FtsK y EnvA.

El descubrimiento de estas actividades enzimáticas ligadas a las proteínas de septación, así como la posibilidad de ensamblarse y localizarse en una estructura septal, ha relanzado el estudio de la división bacteriana, en sí misma y en su conexión con la división eucariota.

También se han descrito los llamados anillos periseptales, estructuras observadas en células plasmolizadas (células suspendidas en un medio hipertónico de alta osmolaridad), que corresponden a determinados compartimentos de la envoltura donde se unen la membrana citoplásmica y la externa; aparecen en regiones preseptales. Tales ánulos son zonas que se predeterminan durante los procesos de elongación, replicación del ADN y duplicación del material celular, para acomodar el complejo enzimático encargado de la septación. La aparición y la evolución de estas estructuras en la célula (orgánulos típicamente procariotas) revela que las señales para indicar el lugar donde debe producirse la separación de las células hijas existen mucho antes de que se observe ningún signo visible de septación.

Hemos dicho que el sáculo es una de las estructuras que debe duplicarse y separarse durante la división bacteriana. El ensamblaje de la capa de peptidoglicano y su maduración, durante la elongación de la bacteria y en la septación, constituye un proceso bioquímico fascinante, en el que los substratos se sintetizan en el citoplasma, se transportan a través de la membrana citoplásmica y se ensamblan en el periplasma. Los precursores citoplásmicos atraviesan la bicapa lipídica de la membrana interna mediante su unión a un lípido portador en un proceso aún poco conocido. Queda mucho por averiguar, en general, sobre el tránsito de compuestos iónicos a través de membranas lipídicas.

Si se nos permite un símil teatral, en el escenario de la división bacteriana han ido apareciendo, a lo largo de los últimos 10 años, nuevos actores (*proteínas*) que han demostrado ser capaces de interpretar papeles similares (*actividades enzimáticas o función*) en una gran diversidad de obras (*especies*). Sin embargo, aún está por escribir la obra maestra (*mecanismo de regulación*) que vertebre a todos en el reparto (*proteínas conocidas y otras presuntamente necesarias*).

JUAN A. AYALA
Centro de Biología Molecular
Severo Ochoa
Universidad Autónoma de Madrid

Supernova 1993J

Radioestructura

Las supernovas no tienen nada que ver, desde el punto de vista conceptual, con las novas. Son astros muy brillantes que de repente aparecen en algún lugar de la esfera celeste con un brillo que luego decaerá progresivamente. Corresponden a explosiones de estrellas. Las estrellas progenitoras de las supernovas liberan, en el breve período de la explosión, la energía que, en caso de no explotar, emitirían en un período de millones de años. De ahí que las supernovas sean más brillantes que millones de estrellas juntas y constituyan, a menudo, los astros dominantes de las galaxias donde residen.

El género humano vive en la Tierra, un planeta del sistema solar, a una distancia del Sol que la luz tarda ocho minutos en recorrer. A su vez, el Sol es una vulgar estrella de la Vía Láctea, nuestra galaxia, como otras cien mil millones de estrellas. La Vía Láctea tiene forma aplanada y el Sol, igual que la mayoría de las estrellas, reside en el disco de la galaxia. Desde la Tierra no podemos ver todas esas estrellas, pues la mayoría se ocultan tras polvo interestelar que cubre los inmensos espacios de la Vía Láctea. Por ello, y porque el azar así lo ha querido, no se ha visto desde la Tierra supernova alguna desde la invención del telescopio, hace casi cuatrocientos años. Es una lástima, porque no mucho antes se dieron varias; por ejemplo, de la supernova del año 1054 nos queda hoy en el firmamento un resto formidable, la nebulosa del Cangrejo.

La Vía Láctea está rodeada de millones de galaxias que se ven en orientaciones muy distintas. Ahora bien, puesto que nuestra visión de las estrellas de estas galaxias está limitada por la potencia de nuestros telescopios y no tanto por el polvo interestelar, podemos observar todos los años un buen número de supernovas. Estos astros brillantes se van clasificando, por acuerdo de la Unión Astronómica Internacional, por dos letras mayúsculas, SN, un número que corresponde al año de descubrimiento y una letra del alfabeto que indica el orden. Así, SN1993J corresponde a la décima supernova descubierta en el año 1993.

Aunque todas las supernovas difieren entre sí, pueden clasificarse en varios tipos y clases. SN1993J ha sido clasificada como de tipo IIb. Debido a su lejanía, las supernovas aparecen en las fotografías como puntos brillantes. Su estudio se reduce a medir la evolución del brillo con el tiempo y a medir las alteraciones en su espectro, es decir, las alteraciones de la emisión en función de la longitud de onda de observación. Los espectros de las supernovas aportan información esencial sobre ellas, que permiten estudiarlas a fondo. Con modelos adecuados de las atmósferas de las estrellas, la evolución del espectro ofrece al astrónomo información sobre el interior de la estrella progenitora, o sea, información sobre el grado de evolu-

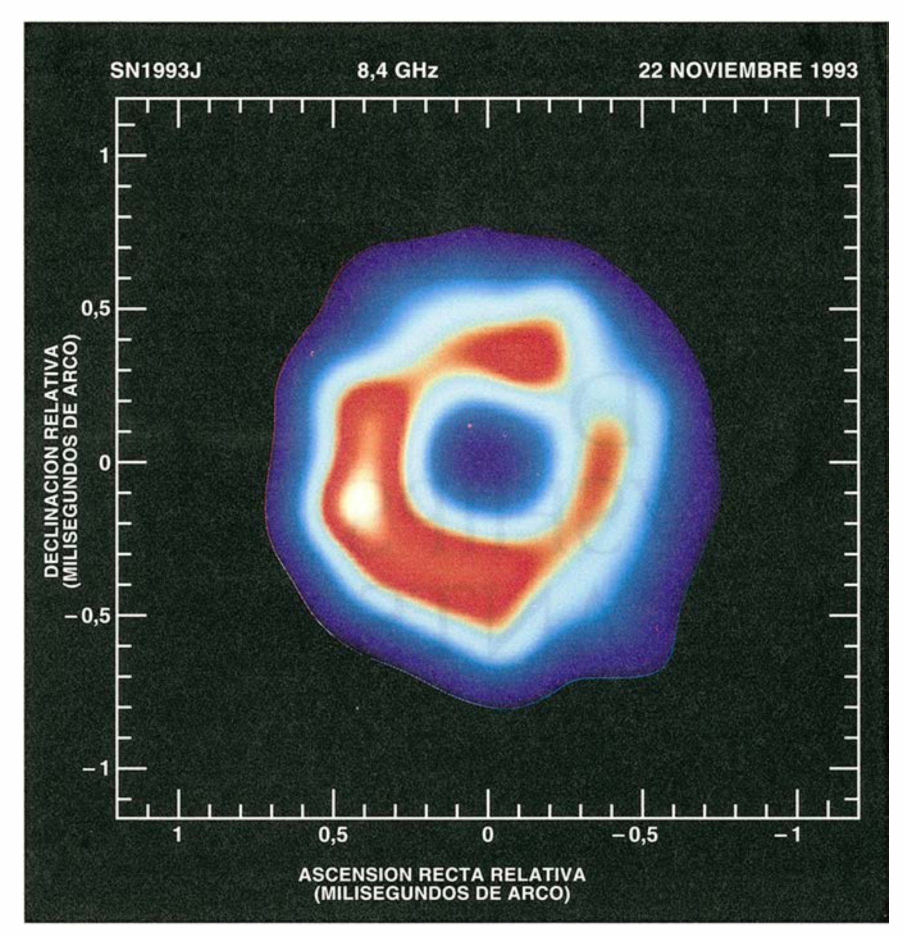


Imagen en falso color de la supernova SN1993J obtenida el 22 de noviembre de 1993, ocho meses tras la explosión, con interferometría intercontinental a la longitud de onda de 3,6 cm. El tamaño angular de la imagen es de 1,1 milisegundos de arco y corresponde a un tamaño lineal 0,06 años-luz. En la imagen el norte está arriba y el este a la izquierda. La forma de rosquilla que se observa en la emisión se debe a la proyección en el plano del cielo de la emisión ópticamente delgada de una corteza esférica. Es la primera vez que se ha obtenido una prueba de esta forma de emisión. La corteza se expande a tal velocidad que recorre una unidad astronómica cada tres horas (la unidad astronómica es la distancia que separa la Tierra del Sol)

ción de la estrella desde su nacimiento hasta su muerte en la explosión. Esta vida de la estrella queda registrada en los materiales que se consumen y crean en las sucesivas fases de reacciones nucleares desencadenadas en el interior de las estrellas, y de las que quedan huella en los espectros.

Sólo unas pocas supernovas son emisoras de ondas de radio. Muy pocas entre ellas tienen suficiente emisión en radio para permitir la utilización de la interferometría de muy larga base (VLBI), técnica interferométrica que está muy desarrollada en el hemisferio boreal pero no en el austral; la VLBI proporciona una resolución angular mil veces mayor que la suministrada por los telescopios ópticos. Por eso ha habido que esperar a una explosión como la de SN1993J en la galaxia M81 para poder ver la estructura en expansión de una supernova con la técnica de interferometría de muy larga base, o sea, para observar algo parecido a lo que hubiéramos contemplado en el visible si la explosión hubiera tenido lugar en nuestra galaxia.

La SN1993J fue descubierta en Lugo por Francisco García. La explosión correspondiente tuvo lugar hace unos doce millones de años y su luz nos ha llegado ahora tras recorrer la distancia que nos separa de la galaxia M81, en la constelación de la Osa mayor. Su brillo en radio ha permitido un aprovechamiento óptimo de la técnica de VLBI. Su expansión a una velocidad de unos 18.000 kilómetros por segundo corresponde, a la distancia citada, a un crecimiento de su tamaño de unos 0,15 milisegundos de arco por mes, lo que es perfectamente medible por VLBI.

Desde primeros de abril de 1993 hemos observado regularmente la supernova con la técnica de VLBI, y hemos procesado los datos tomados simultáneamente en muchos radiotelescopios gigantes de Estados Unidos y Europa.

Ha habido que esperar pacientemente a ver crecer la supernova durante ocho meses para que la disminución de su opacidad nos permitiera ver su forma verdadera y no sólo su apariencia exterior. Con datos obtenidos en noviembre de 1993, los miembros de un equipo internacional de 23 investigadores, 11 instituciones y 7 países, que dirijo, hemos podido determinar que la forma de su radioemisión es la de una gran esfera hueca con una capa exterior bastante estrecha que se expande a la velocidad vertiginosa antes citada. Los resultados del descubrimiento se publicaron en el número de la revista *Nature* del 5 de enero pasado.

Estas observaciones ponen fin a varios modelos teóricos y confirman como modelo más plausible aquel en el que la radiación se crea por un "choque" del gas de la supernova contra el material que rodeaba a la estrella progenitora y que ella misma había expulsado en su evolución. En este "choque" se amplificarían los campos magnéticos existentes y los electrones se acelerarían a velocidades relativistas dando lugar a la radiación de sincrotrón que medimos.

Una comparación de la expansión de la radioestructura con las velocidades de expansión deducidas de los espectros visibles nos ha permitido una determinación de la distancia a la galaxia M81 de 12 millones de años-luz con un error de 2 millones de años-luz, que es compatible con otra medida reciente obtenida con el *Telescopio Espacial Hubble*.

Nos encontramos ahora analizando las observaciones que hemos realizado en 1994. Estas observaciones confirman la forma de la estructura descubierta y muestran que la expansión, extremadamente uniforme, es una expansión libre en el espacio sin desaceleración alguna. El tamaño del radio de la esfera hueca en expansión cuando se escriben estas líneas es de unas 150 veces la distancia del Sol a Plutón, o sea 10 veces menor que el radio de la nube de Oort de cometas, que los astrónomos consideran hoy día el límite conceptual del sistema solar.

JUAN-MARÍA MARCAIDE
Departamento de Astronomía y Astrofísica
Universidad de Valencia

Comunicación intercelular

Proteínas G

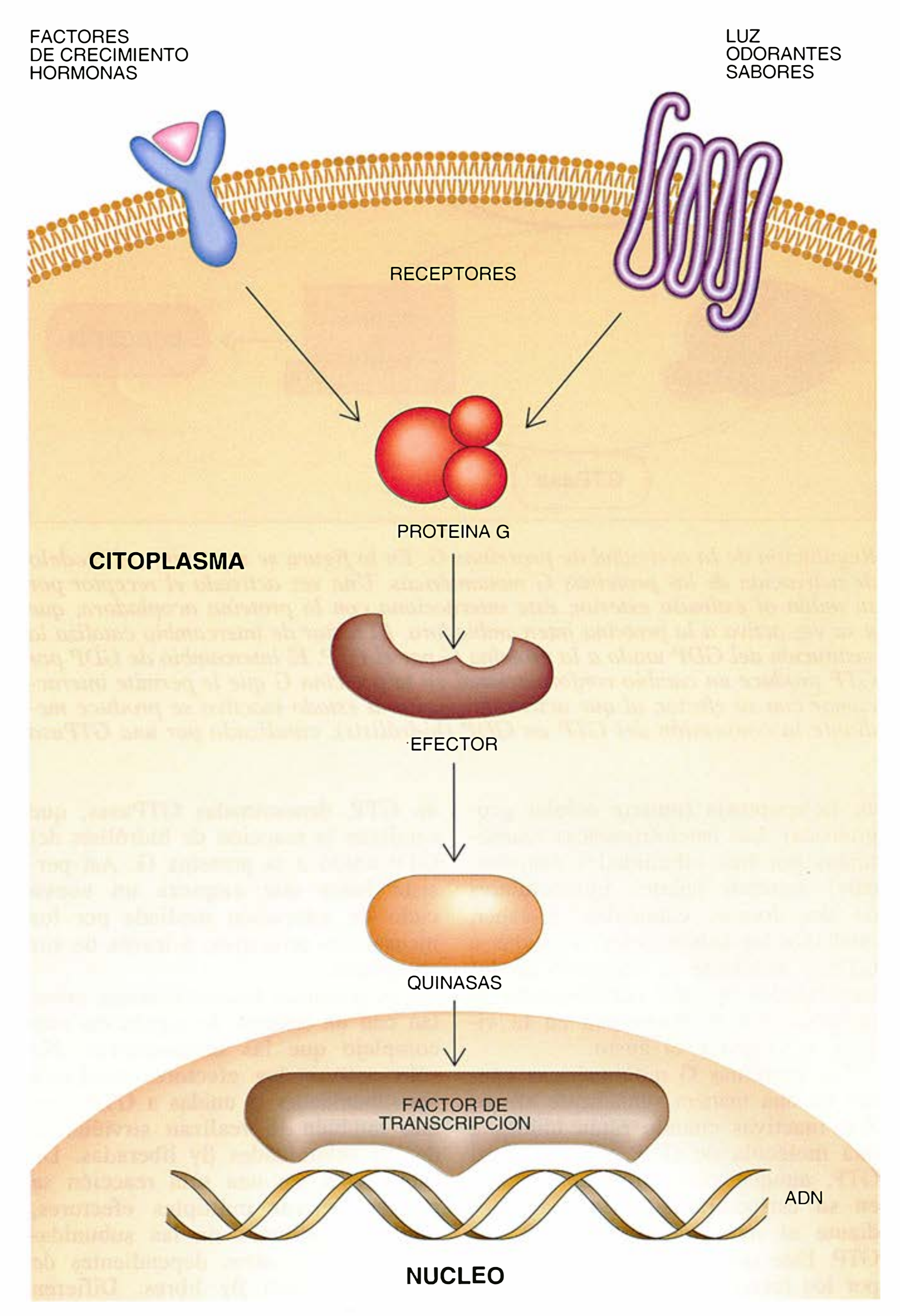
La pervivencia de un organismo multicelular depende de su capacidad de respuesta a los estímulos del entorno percibidos, así como del funcionamiento coordinado de todos su órganos y tejidos. La percepción sensorial y la coordinación de las funciones se basan en la correcta comunicación entre las diferentes células que componen el organismo.

La señal estimuladora puede estar codificada en forma de agente físico (la luz, por ejemplo) o químico (moléculas que confieren olor o sabor). En estos casos, las señales, transmitidas a través del espacio extracorporal, las percibe el organismo mediante células especializadas, que identifican la naturaleza e intensidad del estímulo. La comunicación entre neuronas vehicula la transmisión de estos estímulos hacia los centros del cerebro, responsables de su intepretación y de emitir la respuesta apropiada.

El desarrollo, crecimiento y funcionamiento de los órganos y tejidos de un organismo se regula mediante la generación de señales intracorporales codificadas en forma de mensajeros solubles (factores de crecimiento o diferenciación, hormonas, etcétera). Son los mensajeros primarios. Se requiere también la existencia de células con capacidad de emitir órdenes (células secretoras) y de células capaces de interpretarlas (células efectoras) porque poseen receptores especializados.

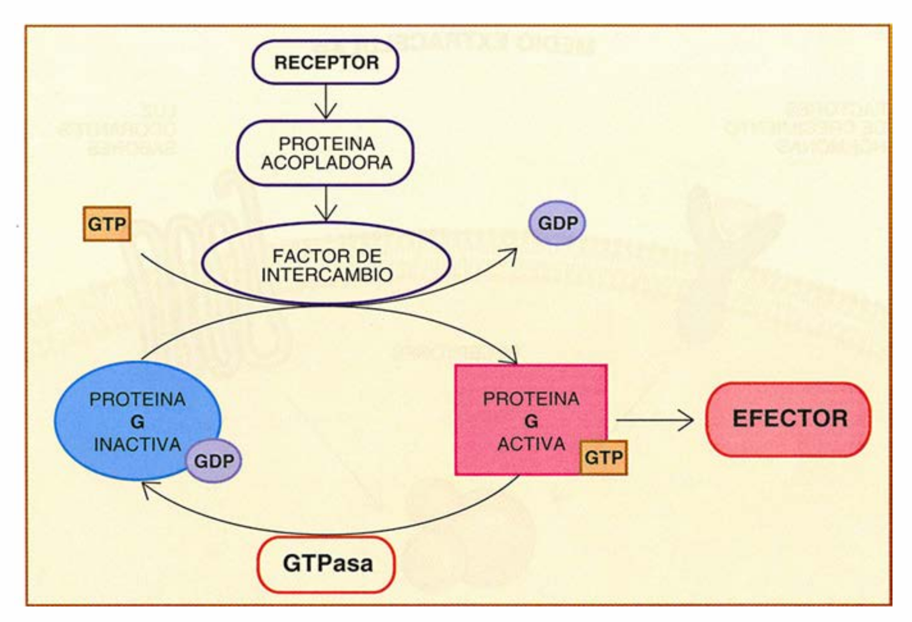
Los mensajeros primarios se transportan, a través del flujo sanguíneo, desde la célula secretora hacia la célula efectora, en la que se decodifican e interpretan. El proceso de decodificación se realiza mediante receptores específicos, ubicados por lo común en la membrana citoplasmática de la célula efectora. Tras la activación de los receptores, se generan nuevas moléculas en el interior celular. Nos referimos a los segundos mensajeros, que activan directamente las enzimas responsables de ejecutar la respuesta.

Tras el descubrimiento de la existencia de receptores específicos para moléculas difundibles, responsables de la transmisión de la señal al interior celular, uno de los primeros componentes de la cascada de señales intracelulares que se identificó, al comienzo de los años setenta, correspondía a una proteína que requería para su funcionamiento guanosín trifosfato (GTP); esta molécula, que sintetizan las propias células, presenta tres fosfatos en su estructura. Las proteínas G, así denominadas por su dependencia de GTP, cumplían una doble función: la de hacer que la señal fuera unidireccional (del exterior al interior de la célula) y la de amplificar la señal, pues basta un solo receptor para activar decenas de moléculas de proteínas G idénticas.



Mecanismo de transmisión de señales. Las proteínas G ocupan un lugar preponderante en la trasmisión de señales mediada por factores de crecimiento, hormonas y estímulos sensoriales. Una vez activadas, interaccionan con sus efectores y estimulan la producción de segundos mensajeros, con la posterior activación de quinasas intracelulares. Las quinasas son responsables de la activación de los factores de transcripción nucleares que regulan la expresión de genes específicos. De esta forma, la señal pasa del exterior celular al núcleo

Se conocen dos familias distintas de proteínas G: monoméricas y heterotriméricas. Las monoméricas, que constan de una sola subunidad, α, se activan cuando están unidas a GTP. Estas proteínas G monoméricas participan en la regulación del crecimiento y la diferenciación celular, en el desarrollo de órganos y tejidos, y



Regulación de la actividad de proteínas G. En la figura se representa el modelo de activación de las proteínas G monoméricas. Una vez activado el receptor por su unión al estímulo exterior, éste interacciona con la proteína acopladora, que a su vez activa a la proteína intercambiadora. El factor de intercambio cataliza la sustitución del GDP unido a la proteína G por el GTP. El intercambio de GDP por GTP produce un cambio conformacional en la proteína G que le permite interaccionar con su efector, al que activa. La vuelta al estado inactivo se produce mediante la conversión del GTP en GDP (hidrólisis), catalizado por una GTPasa

en la apoptosis (muerte celular programada). Las heterotriméricas (constituidas por tres subunidades distintas: αβγ) generan señales intracelulares de dos formas conocidas; a saber, mediante las subunidades α unidas a GTP, y mediante el complejo de las subunidades βγ, una vez liberadas de la subunidad α. Participan en la visión, el olfato y el gusto.

Las proteínas G monoméricas operan de una manera sumamente eficaz. Son inactivas cuando están unidas a una molécula de GDP (semejante al GTP, aunque con sólo dos fosfatos en su estructura) y se activan mediante el intercambio del GDP por GTP. Este intercambio está catalizado por los receptores a través de proteínas intercambiadoras (GRF, Sos), reguladas a su vez por proteínas acopladoras (Grb2, Shc). La unión de GTP induce un cambio conformacional en la estructura de la proteína G que la faculta para interaccionar y activar a su efector.

Una vez unida a GTP, la proteína G permanece en su estado activo hasta que el GTP se hidroliza a GDP+Pi, volviendo a su estado de reposo o inactivo. Esta hidrólisis se realiza de manera muy lenta en las proteínas G monoméricas. Sin embargo, en condiciones normales, todas las proteínas G se hallan en forma inactiva, unidas a GDP; ello se debe a la presencia de proteínas reguladoras de la hidrólisis de GTP, denominadas GTPasas, que catalizan la reacción de hidrólisis del GTP unido a la proteína G. Así persiste hasta que empieza un nuevo ciclo de activación mediada por los mensajeros primarios, a través de sus receptores.

Las proteínas heterotriméricas cuentan con un sistema de regulación más complejo que las monoméricas. No sólo activan los efectores mediante las subunidades α unidas a GTP, sino que también lo realizan sirviéndose de las subunidades βγ liberadas. De esta forma, en una sola reacción se pueden activar múltiples efectores, unos dependientes de las subunidades α-GTP y otros dependientes de las subunidades βγ libres. Difieren también en el mecanismo de activación: las proteínas heterotriméricas interaccionan directamente con los receptores de membrana, sin necesidad de proteínas de intercambio. Por último, la inactivación de la proteína heterotrimérica se desarrolla de forma espontánea; por una parte, la actividad GTPasa intrínseca de las subunidades a es muy elevada produciéndose la hidrólisis del GTP en GDP y, por otra, las subunidades βγ se inactivan al secuestrarlas las subunidades a unidas a GDP.

Los efectores regulados por las proteínas G suelen ser enzimas: fosfolipasas (enzimas que hidrolizan lípidos) y adenilato ciclasas, responsables de la generación de segundos mensajeros como el diacilglicerol, iones calcio o el AMP cíclico. También regulan canales e intercambiadores iónicos. Por su lado, los segundos mensajeros activan enzimas intracelulares, generalmente quinasas, que a su vez activan otras quinasas y factores de transcripción. A los factores de transcripción corresponde regular, en el núcleo de la célula, la síntesis de los ácidos nucleicos mensajeros (ARNm) que determinan las proteínas encargadas de responder a las señales recibidas y ejecutar la orden contenida en el mensajero primario. El resultado neto de este proceso es la transmisión de la señal desde el exterior celular hasta el núcleo, y la ejecución de la orden por la célula efectora.

Las proteínas G que participan en los mecanismos de transmisión de señales son piezas clave en la regulación de múltiples procesos celulares. Son responsables de la decodificación de los estímulos sensoriales (vista, olfato y audición), labor imprescindible para responder adecuadamente a las alteraciones del medio externo. También desempeñan un papel esencial en la comunicación entre las diferentes células. Y así, participan en la regulación del crecimiento celular, la diferenciación y la apoptosis; la decisión de que una célula tome una de estas tres rutas, dependerá, en buena medida, del correcto funcionamiento de las proteínas G, verdaderos interruptores moleculares. De ese modo cabe entender el que diversos miembros de esta clase de proteínas (Ras, Rho, Gs, Gi, Gq, G12/13) se hayan identificado como oncogenes (genes que inducen la formación de tumores) y otros (Rho) desencadenen el proceso de apoptosis.

La participación directa de proteínas G en procesos de tanta importancia para el funcionamiento celular comporta que las alteraciones de las mismas sean causantes de enfermedades; tal ocurre en diversos tipos de cáncer, osteodistrofia hereditaria de Albright, enfermedades cardiovasculares, diabetes mellitus, disfunciones de los sentidos, alcoholismo, disfunción adrenal y del tiroides, obesidad, maduración sexual precoz, y otras.

En resumen, las proteínas G son interruptores moleculares que regulan la correcta interpretación de las señales de comunicación entre las diferentes células de un organismo y las de éste con su entorno.

JUAN CARLOS LACAL
Instituto de Investigaciones Biomédicas, CSIC
Madrid

Sociobiología

Ejemplo de las ratas topo

Grande y peluda, la rata topo de Damaraland no es tan famosa como su prima lampiña. Pese a ello, esta especie ofrece al investigador del comportamiento animal aspectos no menos intrigantes que los de la rata topo desnuda. Las dos especies de rata topo son eusociales, es decir, viven en grupos en los que sólo se reproducen una reina y varios machos, mientras que el resto de la colonia coopera para cuidar a las crías [véase "Ratas topo desnudas", de P. W. Sherman, J. U. M. Jarvis y S. H. Braude; *Investigación y Ciencia*, octubre de 1992]. Este comportamiento (como el de los termes y las hormigas) se encuentra en muy pocos mamíferos, y sigue siendo un rompecabezas de la selección natural.

Al comparar la rata topo desnuda con la de Damaraland, Jennifer U. M. Jarvis y Nigel C. Bennett, de la Universidad de Ciudad del Cabo, y otros han empezado a determinar las características que parecen fundamentales para la evolución de la eusocialidad. Algo hay claro: el pelo no constituye ninguna de ellas. "El interés de la rata topo de Damaraland reside, justamente, en que carece de muchas de las características de la rata topo desnuda", señala Paul W. Sherman de Cornell. El grado de parentesco genético entre miembros de una colonia, por ejemplo, no parece ser tan crucial para la eusocialidad como algunos habían creído. En el caso de las ratas topo desnudas, los hermanos se crían entre sí porque la supervivencia de una hermana o de un hermano viene a suponer prácticamente una clonación. Sin embargo, la colonia de Damaraland manifiesta una mayor diversidad desde el punto de vista genético. Cuando una reina muere, estas ratas topo esperan para reproducirse hasta que se introduce otra hembra procedente de cualquier otro lugar.

Sí parecen ser, por contra, importantes para la eusocialidad los determinantes ecológicos. Lo mismo las ratas topo desnudas que las de Damaraland viven en regiones áridas donde los recursos alimentarios, tubérculos subterráneos, se encuentran dispersos, y las lluvias son impredecibles. Vivir de forma cooperativa asegura disponer de esos recursos preciosos (los animales solitarios no podrían excavar túneles en extensión suficiente para localizar un sustento adecuado). Las otras formas de ratas topo, no eusociales, viven en regiones en las que el alimento se halla a un alcance más asequible. En otras palabras, cuanto más irregular es la distribución del alimento, mayor es la cooperación.

MARGUERITE HOLLOWAY

Venus

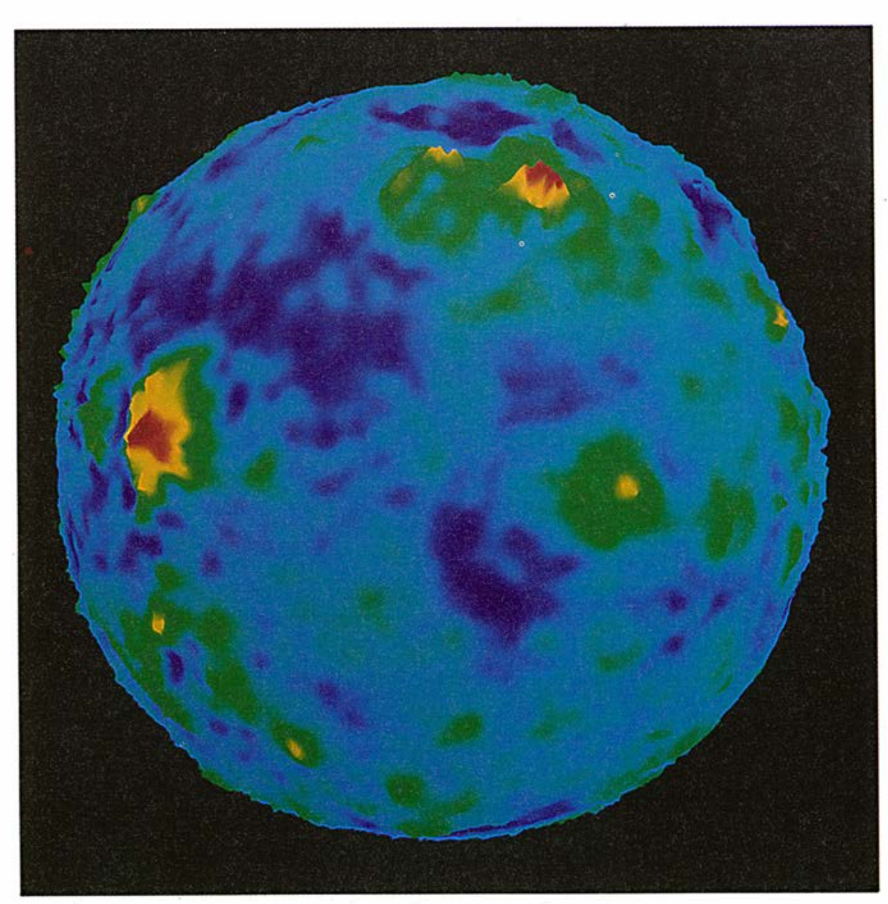
Revelaciones en el lecho de muerte

La nave espacial *Magallanes*, que tomó espectaculares imágenes de la superficie de Venus, dio su vida por la ciencia al precipitarse en la lóbrega atmósfera de Venus el doce de octubre del año pasado. Científicos del proyecto llevaron a la *Magallanes* a una órbita baja, y por último inmoladora, para que pudiera cartografiar el campo gravitatorio del planeta. Minúsculas oscilaciones de la órbita descubrían variaciones locales de la masa de Venus, pistas a su vez de su estructura interna. El resultante mapa gravitatorio se muestra aquí superpuesto a una imagen con un relieve exagerado de la topografía. Las alturas gravitacionales se exhiben en rojo; las depresiones gravitacionales en azul.

Mientras se iba hundiendo, acercándose cada vez más a su catástrofe final, la *Magallanes* realizó hazañas acrobáticas sin precedentes. La resistencia creada al moverse por la fina atmósfera superior le fue haciendo caer más y más; ésta fue la primera prueba real de aerofrenado. El *Rastreador Global de Marte* empleará esta nueva técnica de ahorro de combustible para guiarse hasta una órbita alrededor del planeta rojo en 1997.

La *Magallanes* además hizo girar sus paneles solares como si fuera un molino de viento. Los técnicos midieron cuánto empuje hacía falta para que la sonda no se pusiese a dar vueltas; esta información ofreció datos sorprendentes sobre la atmósfera de Venus. Según Robert H. Tolson, de la Universidad George Washington, la resistencia atmosférica a unos 150 kilómetros sobre la superficie fue alrededor de la mitad de la prevista, pero a alturas menores aumentó luego inesperadamente. "Este es un método de medir las propiedades atmosféricas nuevo y apasionante", dice, y podrá aplicarse pronto a satélites en órbita terrestre. La *Magallanes* no vivirá más, pero de sus cenizas han surgido nuevas ideas y nuevas preguntas.

COREY S. POWELL



Fotografía de Venus reelaborada en el Laboratorio de Propulsión a Chorro

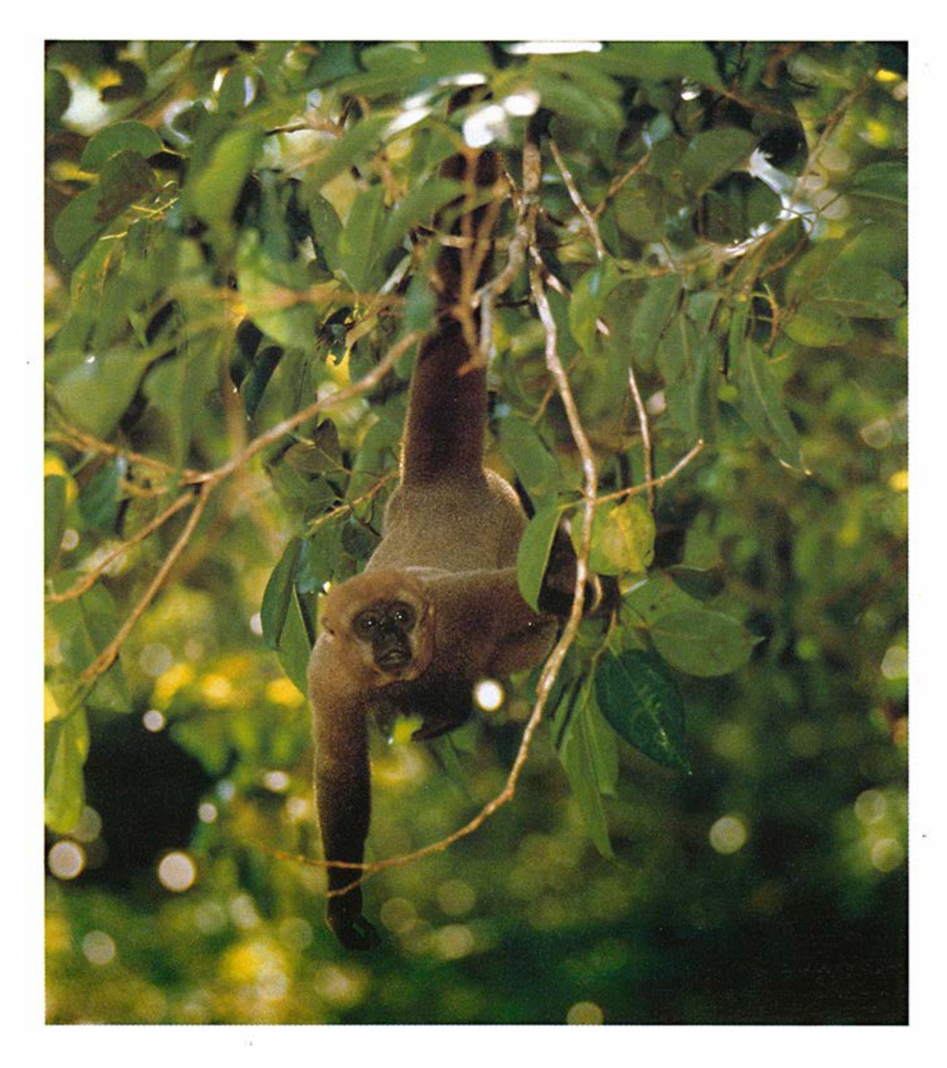
Fotos: Xavier Ferrer y Adolfo de Sostoa
Texto: Xavier Ferrer

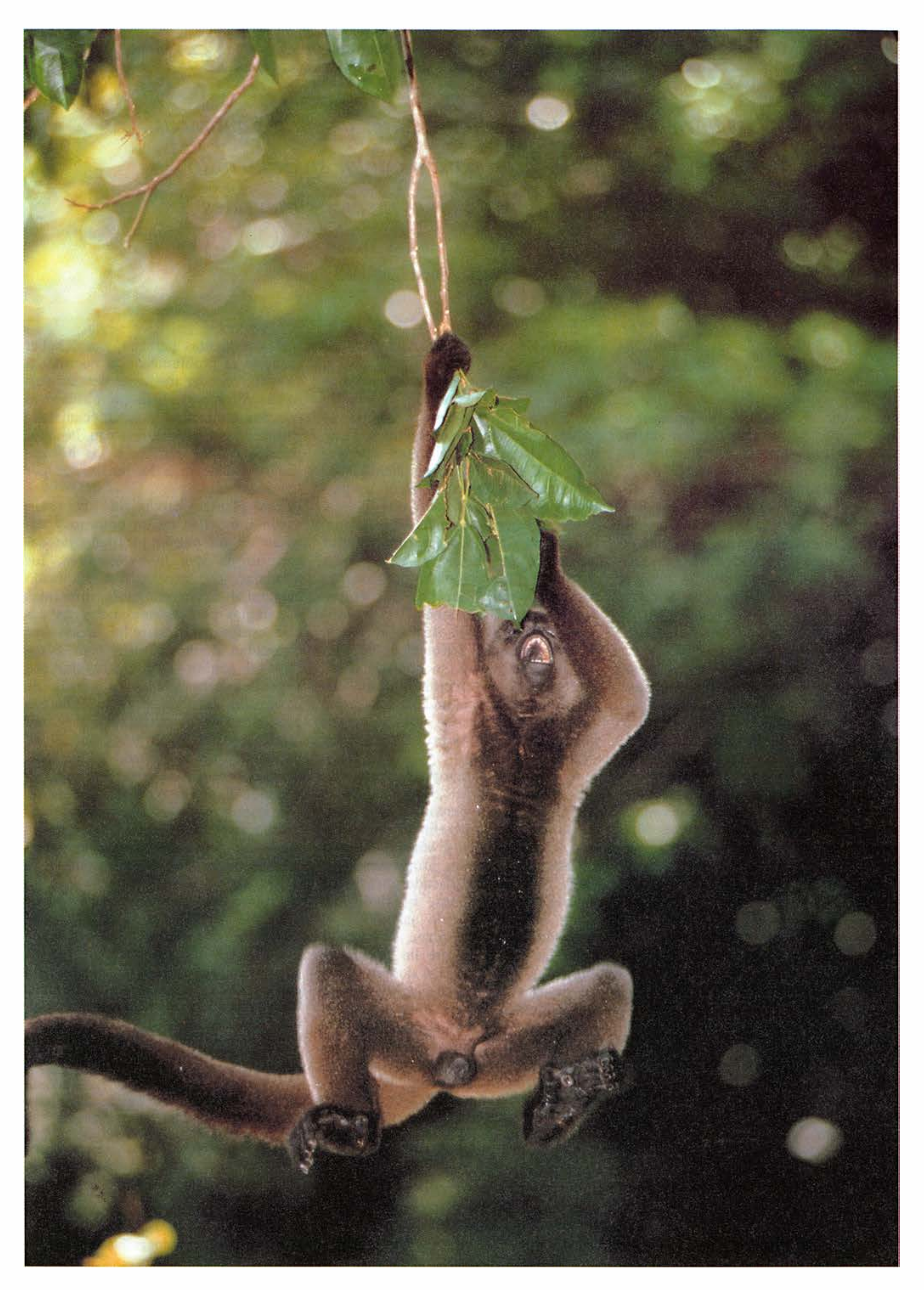
Barrigudo

El barrigudo (*Lagothryx lagothricha*), llamado también mono lanoso por el aspecto de su pelo, hace honor a su nombre: es uno de los mayores monos de América del Sur. Puede alcanzar los 10 kilos de peso. Habita en las selvas tropicales y sube montaña arriba hasta los 2500 m de altitud. Como la mayoría de los monos, es de costumbres diurnas. Ocupa los pisos alto y medio de la selva, donde se alimenta de hojas, frutos maduros, semillas y algunos artrópodos. Tiene querencia por las selvas maduras, pero desaparece de las intervenidas por el hombre (secundarias).

De hábitos sociales, forma grupos de hasta sesenta individuos. Por su tamaño y por la calidad de su carne, la mejor de todos los simios de la región al decir de muchos, sufre la caza implacable del hombre. Pese a la amplia distribución geográfica de que disfruta, se le ha incluido en la lista roja de los animales en peligro de extinción, dentro de la categoría de "vulnerable". Tal es el acoso a que se ve sometido por el hombre.

Es de carácter tranquilo, cariñoso y dócil. En las zonas de reserva, exentos de la persecución humana, no se oponen a que nos aproximemos, como este joven ejemplar, que no sólo no huyó ante nuestra presencia, sino que se acercó curioso, mientras le fotografiábamos. Nos hallábamos en el estado brasileño de Amazonas.





Las hormonas vegetales

Las hormonas vegetales son mensajes o señales químicas que las células utilizan para modular su desarrollo y adaptarlo a las condiciones medioambientales

Antonio Granell y Juan Carbonell

A lo largo de la evolución, las células, en un principio independientes, se asociaron en complejos pluricelulares, que, con el transcurso del tiempo, constituyeron los organismos superiores. La actividad de estos últimos se repartió en tejidos y órganos gracias a la modificación estructural de grupos de células y a su especialización en diferentes funciones.

Esta nueva estructuración planteó la necesidad de un desarrollo armónico en el espacio y en el tiempo. Se requirió también la coordinación de la actividad celular en el seno de las nuevas estructuras. Para ello, cada una de las células debía tener información procedente de las otras y asimilar la información aportada por el entorno. Había que crear señales informativas intercelulares. Y se recurrió a moléculas capaces de desencadenar reacciones, o respuestas, en las células receptoras. Estas moléculas, descubiertas inicialmente en el mundo animal, recibieron el nombre de hormonas (del término griego que designa la acción de ponerse en movimiento). Su síntesis, degradación o simple variación de concentración, en determinadas células, actúan de señales cuyo significado lo captan e interpretan otras, que poseen receptores activos de dicha información.

ANTONIO GRANELL y JUAN CARBONELL son investigadores del CSIC en el Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas, centro mixto de la Universidad Politécnica de Valencia y del CSIC. Desde 1990, colaboran en el estudio de la regulación hormonal del desarrollo y la senescencia de flores y frutos. Carbonell se doctoró por la Autónoma de Madrid en 1973 y amplió su formación en la Universidad de California en Berkeley. Granell se doctoró por la de Valencia en 1987 y completó sus estudios en la Universidad de Pennsylvania en Philadelphia.

Tras los experimentos realizados entre 1926 y 1928 por F. W. Went, en Utrecht, sobre la influencia de la luz en el crecimiento del coleóptilo de avena, el término hormona se aplicó también a los vegetales. (Llámase coleóptilo a la vaina que envuelve al epicótilo de las semillas de las monocotiledóneas.) Went se preguntaba si el brote de una planta, que crece en presencia de la luz, informaba de ello a la parte inferior del tallo, las hojas y la raíz. La respuesta proporcionada por los experimentos de Went llevó al descubrimiento de la auxina. Esta sustancia se transportaba desde el ápice, lugar de síntesis, hasta el coleóptilo, zona de respuesta, y provocaba un efecto sobre el crecimiento que dependía de su concentración. La auxina cumplía, pues, todos los requisitos para considerarse la primera hormona vegetal.

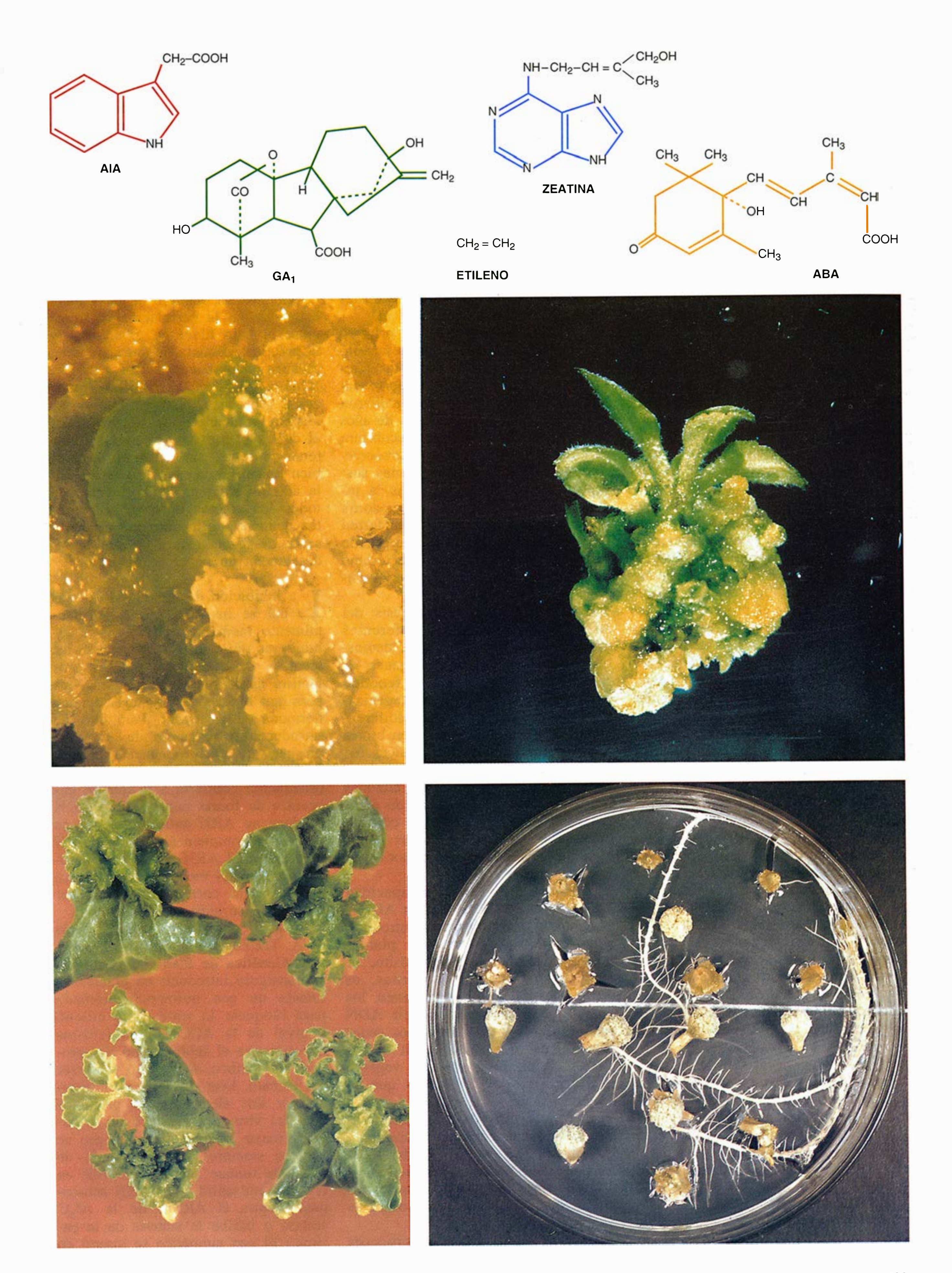
A partir de los años cincuenta fueron descubriéndose otras hormonas que afectaban al crecimiento y desarrollo vegetal: giberelinas, citoquininas, ácido abscísico y etileno. Además de esas fitohormonas propiamente dichas, se han identificado otras sustancias —poliaminas, brasinólidos, ácido salicílico, ácido jasmónico y derivados, oligosacarinas, etcétera—, incluidas a veces entre las hormonas vegetales. No está claro que en todos los casos se dé el característico efecto a distancia de las hormonas, razón por la cual éstas y los compuestos relacionados se agrupan bajo la denominación general de sustancias reguladoras del crecimiento vegetal o, simplemente, fitorreguladores. Todos los cuales comparten una característica, a saber, la de poder regular y alterar el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Ninguno de los reguladores descritos en las plantas ejerce una función hormonal conocida en los animales, ni el sistema endocrino de éstos guarda equivalente en aquéllas. Animales y plantas parecen, pues, haber resuelto el problema de la comunicación intercelular mediante señales químicas diferentes. Ello no obsta para que los elementos y los mecanismos intracelulares que gobiernan las respuestas de las plantas a las hormonas se asemejen a los utilizados por los animales.

Las plantas captan la luz solar, viven inmóviles en un entorno y carecen de un patrón prefijado de desarrollo en una fase temprana; los animales, por contra, han adquirido capacidad de movimiento, diferentes estrategias para alimentarse y un patrón estricto de desarrollo. La enorme capacidad de las plantas para adaptarse al medio y de los reguladores vegetales para alterar su patrón de desarrollo indican, por un lado, la plasticidad de la célula vegetal y, por otro, la versatilidad y potencialidad de los fitorreguladores. ¿Son estas características las que determinaron la elección de un conjunto diferente de mensajeros químicos intercelulares? ¿Hubo ancestros comunes a animales y plantas con unos mismos mecanismos intracelulares de respuesta?

Las hormonas vegetales participan en numerosos procesos fisiológicos, y no siempre resulta fácil establecer

1. HORMONAS Y REGULADORES del crecimiento vegetal se agrupan en familias, cuyos cinco elementos más representativos se muestran en la parte superior: auxinas (AIA, ácido indolacético), etileno, giberelinas (GA_1), citoquininas (zeatina) y ácido abscísico (ABA). En las fotografías se ilustra el aprovechamiento de la capacidad que poseen las hormonas vegetales para dirigir el crecimiento y la morfogénesis en cultivos celulares. Variando las proporciones de hormonas y reguladores se puede obtener tejido poco diferenciado (callo, *zona amarilla*) o inducir la diferenciación de yemas (*zona verde, arriba, izquierda*), tallos (*arriba derecha y abajo izquierda*) y raíces (*abajo derecha*). (Fotografías cedidas por L. Roig y V. Moreno.)


CH2–COOH
NH
AIA
O
OH
CH2
CO
H
HO
COOH
CH3
GA1
NH–CH2–CH = C
CH2OH
CH3
N
N
N
NH
ZEATINA
CH2 = CH2
ETILENO
CH3
CH3
CH3
CH
C
CH
CH
OH
O
CH3
COOH
ABA

si es una sola o la proporción adecuada de varias de ellas la que ejerce el efecto fisiológico. ¿Cómo abordar, pues, el estudio de la acción de una hormona en medio de una maraña de metabolitos y reacciones? Los investigadores se esfuerzan por emplear sistemas experimentales apropiados en los que una determinada hormona desempeña un papel único o preponderante sobre algún proceso fisiológico.

De un tiempo a esta parte se recurre con frecuencia creciente al empleo de mutantes que presentan alteraciones en la síntesis de la hormona o en algún elemento de la cadena de respuesta. En los mutantes del primer tipo, puede darse la síntesis permanente de la hormona o, por contra, tratarse de un bloqueo parcial o total. En los mutantes relativos a la respuesta, puede existir una falta de percepción total o parcial de la hormona o, por el contrario, una respuesta incesante aunque la hormona no esté presente.

Se sabe que las hormonas ejercen una función reguladora en el desarrollo normal de la planta. Se sabe también que hormonas y reguladores pueden modificar el programa de desarrollo de las células vegetales. Tres hechos avalan esta afirmación: la respuesta de las plantas, mediada por hormonas, a cambios en el entorno; la respuesta de las células vegetales a diferentes fitohormonas, cuando crecen en cultivo *in vitro*, y la base molecular de la acción de ciertos fitopatógenos.

A diferencia de los animales, las plantas manifiestan una notable capacidad para responder ante los cambios del entorno modificando su velocidad de crecimiento e incluso su programa de desarrollo. Una planta que crece en una zona frondosa o en la oscuridad tiende a ahilarse y a alargar los entrenudos de su tallo; cuando alcanza regiones de mayor luminosidad, éstos se acortan. Por otra parte, según sean las condiciones ambientales, el meristemo apical puede continuar formando nuevas hojas y tallos, o bien modificar su programa de desarrollo para transformarse en un meristemo floral. En el alargamiento de los entrenudos y en la diferenciación floral se hallan implicadas ciertas hormonas.

Las plantas se distinguen también por tener células totipotentes, dotadas de capacidad de regenerar un organismo completo aun después de haber alcanzado ellas un elevado grado de diferenciación. Por otra parte, desde los trabajos pioneros en el laboratorio de F. Skoog, de la Universidad de Wisconsin, se sabe que la adición de hormonas o fitorreguladores en cantidades apropiadas a un medio de cultivo, donde crecen células indiferenciadas o con diferente grado de diferenciación, induce la formación de órganos. Según la proporción de auxinas y citoquininas, las células pueden originar tallos, raíces o tejido indiferenciado. Las proporciones apropiadas difieren de unas especies a otras; de ahí que la regeneración de las plantas dependa tanto de los fitorreguladores utilizados como de las especies en las que se ensayan.

No ha sido el hombre el primero en modificar el patrón de desarrollo y diferenciación de las plantas alterando las concentraciones hormonales. Ciertos patógenos desarrollaron ingeniosas estrategias millones de años antes de que el hombre descubriera su existencia. Así, cuando *Agrobacterium tumefaciens* infecta plantas susceptibles, induce tumores tras la incorporación en algún cromosoma de la planta de ADN-T ("transferred DNA"); ese fragmento incorporado forma parte del plásmido bacteriano inductor de tumores ("tumor inducing", o Ti).

Experimentos de mutagénesis del ADN-T, realizados por diferentes grupos de Europa y EE.UU., demostraron la existencia de tres genes, *A*, *B* y *C*, que determinan el fenotipo del tumor. Según el gen mutagenizado, se produce un tumor indiferenciado ($a^+ b^+ c^+$), un tumor con brotes ($a^- b^+ c^+$) o un tumor con raíces ($a^+ b^+ c^-$). Se averiguó más tarde que dichos genes codificaban las enzimas implicadas en la biosíntesis de auxinas y citoquininas y que las concentraciones de dichas hormonas determinaban el fenotipo del tumor.

Podemos aprovechar la capacidad de la bacteria de transferir ADN-T a plantas susceptibles para introducir genes foráneos y producir plantas transgénicas. Con ese propósito, se emplean plásmidos desarmados, es decir, plásmidos que mantienen los genes que permiten introducir ADN en una planta y en los que los genes patogénicos, que provocarían alteraciones en el desarrollo del vegetal, se sustituyen por los genes que se desea introducir. Las plantas transgénicas son en todo igual a las normales, salvo en el carácter determinado por el gen introducido. Se ha recurrido a esta estrategia para incorporar diversos tipos de genes, incluidos algunos que modifican la biosíntesis de hormonas.

Para averiguar en qué procesos interviene una hormona, podemos adoptar varias estrategias experimentales. Por ejemplo, estudiar la correlación entre aumentos o disminuciones de la concentración endógena de una hormona y un proceso fisiológico determinado (crecimiento, desarrollo, cambio metabólico u otros). Una segunda estrategia consiste en inhibir la producción de una hormona, observar qué proceso queda afectado y, por fin, tratar de restituir el comportamiento normal mediante la adición exógena de la hormona.

Tenemos un ejemplo de la primera estrategia en la correlación existente entre el bajo nivel de giberelinas y la práctica ausencia de entrenudos en algunas plantas enanas de guisante. ¿Qué ocurre si aplicamos, desde fuera, ácido giberélico? Los entrenudos se alargan y alcanzan un tamaño igual al de las plantas silvestres. Conviene tener presente, sin embargo, que, si bien muchos procesos se alteran con la adición exógena de hormonas, no todos los efectos observados permiten deducir que la hormona está presente de forma natural y, por tanto, desempeña un papel fisiológico.

La inhibición de la síntesis hormonal se ha realizado experimentalmente mediante aplicación de inhibidores químicos. El avance de las técnicas de ingeniería genética nos facilita ahora nuevas estrategias que permiten bloquear la síntesis de una hormona en particular. Para ello, se introduce un segmento de ADN de un gen, que determina una enzima de la biosíntesis de una hormona, en orientación contraria a la que se encuentra de forma natural. Este ADN produce un ARN antisentido, que es un ARN complementario del ARN mensajero. El ARN antisentido impide que el ARN mensajero se traduzca en la enzima correspondiente y, por tanto, que se sintetice la hormona.

En este contexto, en el laboratorio de A. Theologis, del Centro de Expresión Genética de Plantas en Albany, se consiguió introducir en plantas de tomate un gen quimérico diseñado para bloquear la síntesis de etileno a nivel de la ACC sintasa (enzima que sintetiza el ácido amino ciclopropano carboxílico, metabolito precursor del etileno). Este gen estaba constituido por dos elementos: el promotor 35S del virus del mosaico de la coliflor (cuya función es que el gen se exprese siempre) y el segmento de ADN de tomate que se transcribe en el ARN antisentido. (El ARN antisentido bloquea el ARNm de la ACC sintasa e inhibe la síntesis de la enzima.) El gen quimérico se insertó en

el ADN-T, de un plásmido Ti desarmado, el cual permitió la transformación estable de plantas de tomate.

En las plantas transgénicas se observó una reducción significativa de la síntesis de etileno. ¿Por qué? Porque el ARN antisentido producido por el ADN foráneo se unió al ARN mensajero de la ACC sintasa, lo que comportó una fuerte caída de los niveles de la enzima. Al no haber producción de precursor, disminuyó la de etileno. Por consiguiente, el fruto no maduró, al menos durante el período normal. Maduración que sí se alcanzó con la adición externa de etileno. De todo ello se infería que la ausencia de maduración debíase a la ausencia de etileno endógeno y no a otros factores que pudieran haberse alterado durante el experimento.

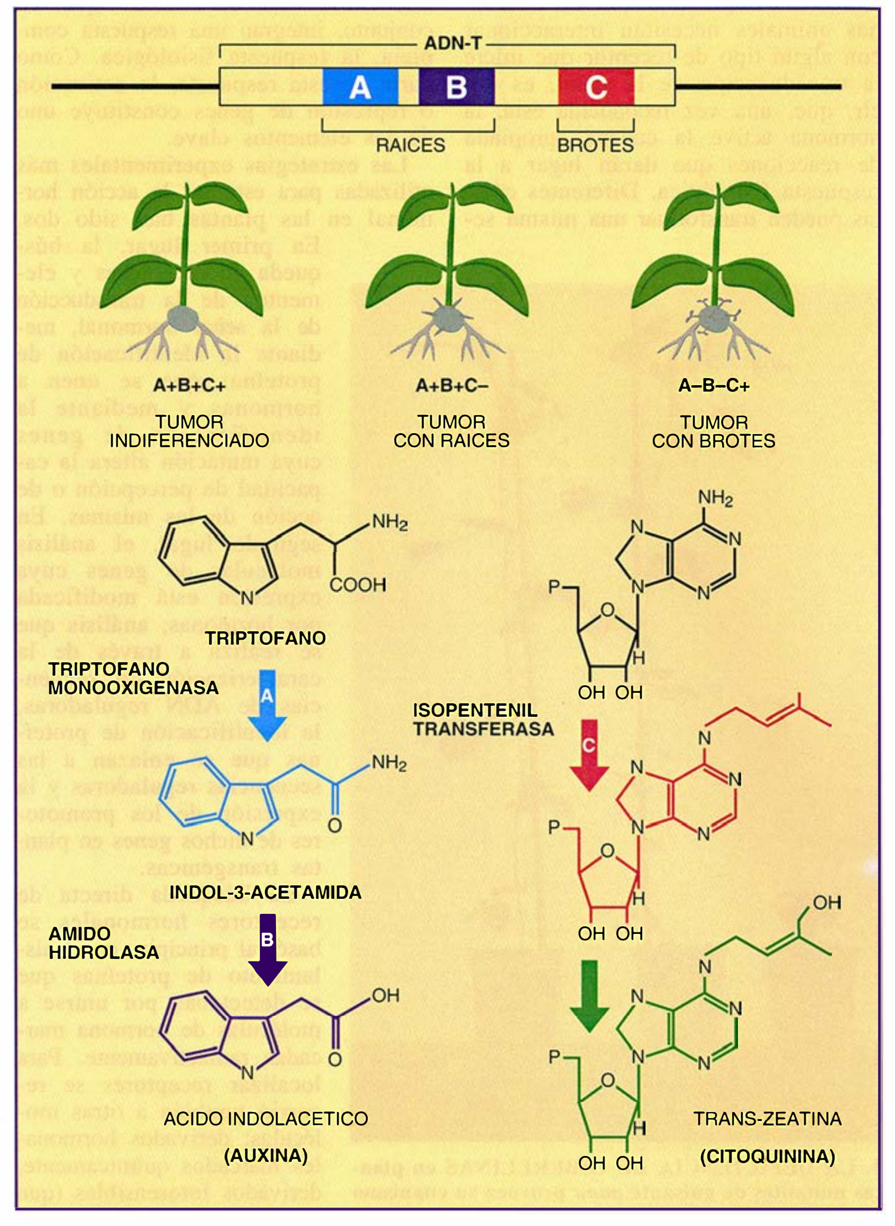
De forma similar, en el laboratorio de D. Grierson, de la Universidad de Nottingham, se logró bloquear la síntesis de la ACC oxidasa, enzima que cataliza la formación de etileno a partir de amino ciclopropano carboxílico. Se consiguió introduciendo el gen antisentido correspondiente. Se obtuvo así la inhibición de la síntesis de etileno y la acumulación de niveles altos de ACC.

Asimismo, se pueden introducir genes que determinan las enzimas que, por otra vía metabólica, pueden eliminar algunos de los precursores de la síntesis de una hormona. A este respecto, H. J. Klee y colaboradores, de la compañía Monsanto, introdujeron en plantas de tomate el gen, de origen bacteriano, que codifica la ACC desaminasa. Esta enzima, que cataliza la degradación de ACC en ácido α-cetobutírico, no está presente de forma natural en el tomate, pero la planta la sintetizó tras la introducción y expresión del gen bacteriano. La acción de la enzima provocó el consumo de ACC a través de una nueva ruta.

El bloqueo de la síntesis del etileno por cualquiera de los procedimientos descritos impide la maduración del fruto del tomate, lo que demuestra el papel inductor de la hormona y la posibilidad de controlar este proceso a través de técnicas biológicas.

La vía biosintética del etileno es corta, y se conocen ya muchos de los elementos que intervienen en su regulación. No ocurre así con otras hormonas. En el caso de las giberelinas, una superfamilia de más de noventa compuestos, ha habido que determinar cuáles de ellos revisten interés fisiológico. El análisis de mutantes en maíz por B. O. Phinney y su grupo, de la Universidad de California en Los Angeles, y otros trabajos en arroz y guisante han permitido establecer que sólo unas pocas giberelinas (GA_1 y GA_3, fundamentalmente) desempeñan un papel hormonal en las plantas.

Tiene mucho que progresar todavía la fisiología vegetal en el conocimiento de la regulación de la biosíntesis de la mayoría de las hormonas. El número elevado de conjugados (hormonas unidas a otros metabolitos) dificulta la identificación de los que tienen un papel activo o actúan como precursores o secuestradores de las hormonas. Falta por identificar, además, las enzimas reguladoras y, en definitiva, las rutas biosintéticas que operan *in vivo*. Muy a menudo, son estas formas conjugadas las más abundantes y las que se transportan de una parte a otra de la planta. Otras veces es el precursor de la hormona activa el que viaja (caso del ACC). ¿Son éstos, conjugados y precursores, las formas más rápidas y versátiles de disponer de un sistema de mensajeros intercelulares que permita a la planta ajustarse a las variaciones en el medio ambiente o es una mera consecuencia



2. DURANTE LA INFECCION de una planta por *Agrobacterium tumefaciens*, el microorganismo transfiere a las células vegetales un fragmento de ADN (el ADN-T) contenido en el plásmido Ti. El ADN-T es portador de genes (*A, B, C*) que permiten la síntesis de ácido indol-acético (auxina) y de isopenteniladenina, precursor de la trans-zeatina (citoquinina), que son las hormonas responsables del fenotipo del tumor. Según sufra la mutagénesis uno u otro de los genes, se desarrollarán tumores con fenotipos diferentes.

del carácter de metabolito secundario de las hormonas vegetales?

Pese a la variedad de tamaños y de estructuras químicas (desde el etileno, un gas, de estructura muy sencilla, hasta las giberelinas y citoquininas, de estructura compleja), puede considerarse que todas las hormonas vegetales son moléculas de bajo peso molecular y de conformación rígida. A diferencia de proteínas y ácidos nucleicos, las hormonas no procesan información por sí mismas; su acción depende del procesamiento de la señal en los tejidos o células que tienen la capacidad para reconocer dicha señal y transformarla en información.

Se ha comprobado que las hormonas animales necesitan interaccionar con algún tipo de receptor que inicie la transduccción de la señal, es decir, que, una vez reconocida ésta, la hormona active la cadena apropiada de reacciones que darán lugar a la respuesta fisiológica. Diferentes células pueden transformar una misma señal en diferentes informaciones, según la batería de receptores disponibles de acuerdo con el lugar que ocupan y en razón de la función que realizan en un momento determinado.

La acción hormonal depende, pues, de la concentración de la hormona, de la presencia y características del receptor y de los elementos que están involucrados en la cadena de transducción de la señal. El complejo hormona-receptor, esto es, el receptor activado, constituye el primer eslabón de la cadena de la transducción de la señal que provoca una respuesta primaria; ésta, a su vez, inicia una serie de cambios que, en conjunto, integran una respuesta compleja, la respuesta fisiológica. Como parte de esta respuesta, la activación o represión de genes constituye uno de los elementos clave.

Las estrategias experimentales más utilizadas para estudiar la acción hormonal en las plantas han sido dos. En primer lugar, la búsqueda de receptores y elementos de la transducción de la señal hormonal, mediante la identificación de proteínas que se unen a hormonas y mediante la identificación de genes cuya mutación altera la capacidad de percepción o de acción de las mismas. En segundo lugar, el análisis molecular de genes cuya expresión está modificada por hormonas; análisis que se realiza a través de la caracterización de secuencias de ADN reguladoras, la identificación de proteínas que se enlazan a las secuencias reguladoras y la expresión de los promotores de dichos genes en plantas transgénicas.

La búsqueda directa de receptores hormonales se basó, al principio, en el aislamiento de proteínas que se detectaban por unirse a moléculas de hormona marcadas radiactivamente. Para localizar receptores se recurrió también a otras moléculas: derivados hormonales marcados químicamente, derivados fotosensibles (que se anclan en el receptor al sufrir una modificación estructural causada por la luz) y anticuerpos antiidiotipos (anticuerpos de topología similar al conjugado hormonal y que se preparan utilizando, por antígeno, anticuerpos contra el conjugado hormonal).

3. LA DEFICIENCIA DE GIBERELINAS en plantas mutantes de guisante *nana* provoca su enanismo (*izquierda*). Los mutantes *nana* tienen bloqueada la síntesis de GA_{12}-aldehído y, por tanto, la síntesis de GA_1, que es la giberelina activa inductora del alargamiento de los entrenudos. La adición de ácido giberélico (GA_3), otra giberelina activa, a las plantas enanas provoca el alargamiento de los entrenudos y determina que las plantas *nana* tratadas (*centro*) alcancen la altura de una planta silvestre (*derecha*).

No todas las proteínas que se enlazan a hormonas son receptores. Las hormonas se pueden unir específicamente a otras proteínas; por ejemplo, enzimas y transportadores; de forma inespecífica se unen también a otras moléculas y estructuras. En el coleóptilo de maíz, se ha identificado y caracterizado la proteína que se une a la auxina, o ABP ("*A*uxin-*B*inding *P*rotein"), que se localiza en el retículo endoplasmático y en la parte exterior de la membrana plasmática. La secuencia de nucleótidos de un gen que codificaba la ABP y la de aminoácidos de la proteína fueron obtenidas al mismo tiempo por N. Inohara y colaboradores, de la Universidad de Osaka, y por otros grupos de la Universidad de Bonn y del Instituto Max Planck de Colonia.

Los anticuerpos preparados contra la ABP bloquean la hiperpolarización de membranas de protoplastos de tabaco inducida por auxinas. Además, cierto péptido, cuya secuencia es la de la región terminal carboxílica de la ABP, provoca modificaciones en los canales que regulan la entrada y salida del ion K^+ a través de la membrana celular; estas alteraciones, de la misma naturaleza que las provocadas por altas concentraciones de auxina, ocurren en tan sólo un par de minutos y producen una alcalinización del *p*H citosólico. Esta similitud y rapidez del efecto sugieren que la ABP podría ser responsable de la respuesta primaria a la auxina. ¿Será finalmente la ABP un verdadero receptor de auxinas?

Los avances más significativos en la identificación de los elementos que, además del receptor, integran una cadena de transducción de la señal hormonal se han obtenido del análisis molecular de genes cuya mutación afecta a la respuesta hormonal. En buena medida, este progreso se ha debido al empleo, como sistema experimental, de *Arabidopsis thaliana*, planta que posee uno de los genomas más pequeños.

En plantas silvestres de *Arabidopsis* que crecen en la oscuridad, el etileno induce lo que se llama la triple respuesta: inhibición del crecimiento del hipocótilo (parte del eje caulinar que se halla debajo de los cotiledones) y de la raíz, engrosamiento del hipocótilo y acentuación de la curvatura apical. En el laboratorio de J. Ecker, del instituto de ciencias vegetales de la Universidad de Pennsylvania, se han aislado mutantes de *Arabidopsis* que presentan alterada la sensibilidad al etileno. En-

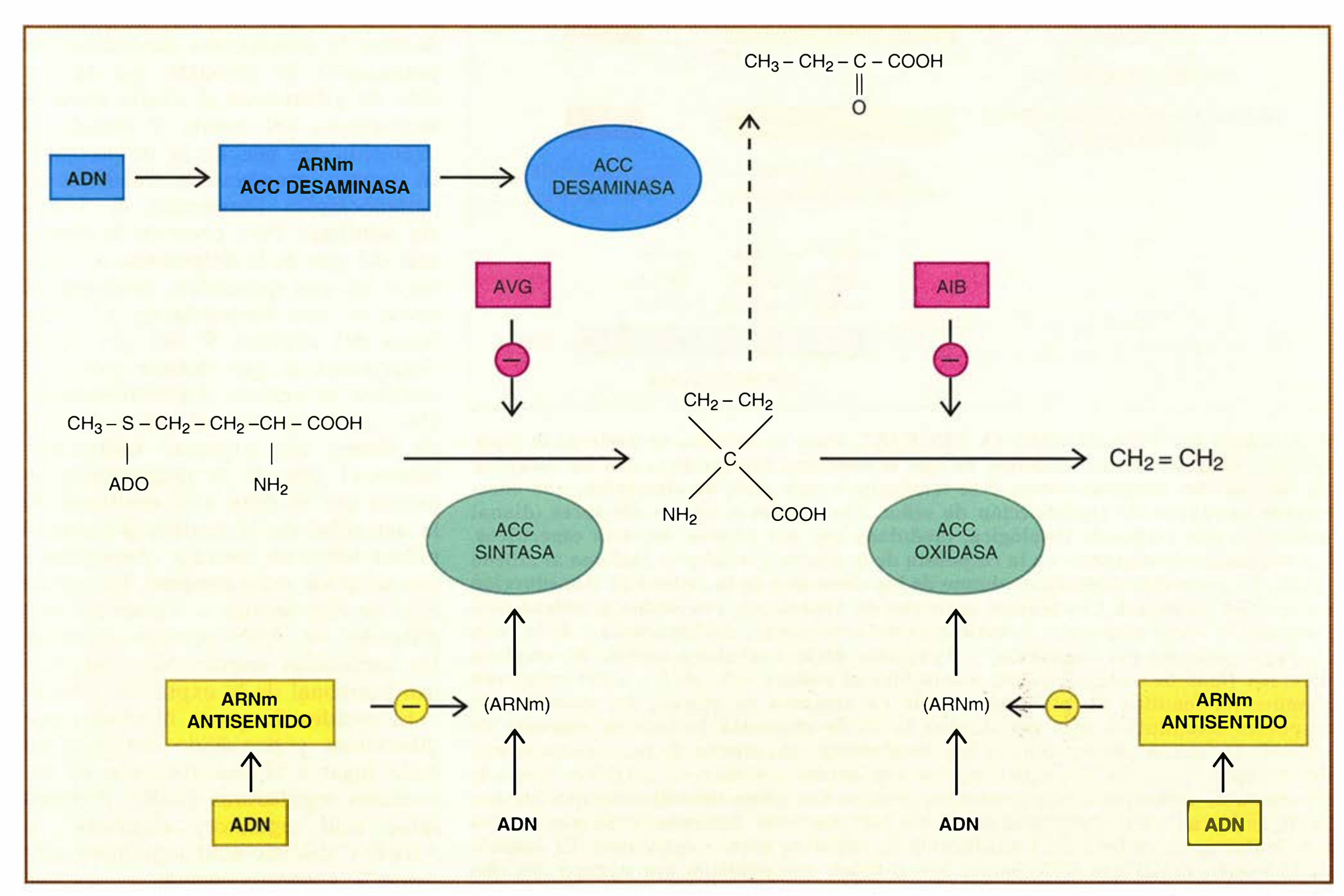
tre ellos, destacan los mutantes *ein* (*e*thylene *in*sensitive), que son insensibles al tratamiento con etileno, y los *ctr* (*c*onstitutive *t*riple *r*esponse), que manifiestan siempre la triple respuesta, incluso en ausencia de etileno. Otro mutante, el *hls* (*h*ook*l*es*s*, sin curvatura apical), presenta alteraciones en sólo una de las tres respuestas al etileno.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la secuencia ordenada de actuación de los productos de estos genes parece ser Etr/Ein1 – Ctr – Ein3 – Hls. Se conoce la base molecular de alguna de esas mutaciones por análisis de la secuencia de los correspondientes genes, tanto del alelo normal como los genes de los alelos mutantes. La comparación de la secuencia del gen *CTR* con las secuencias de otros genes sugiere que la proteína determinada por el mismo es una serintreonín quinasa, similar a las proteínas Raf. Estas proteínas forman parte de la cascada de quinasas de la ruta de la proteína Ras, vía de importancia decisiva en el control del crecimiento en organismos muy dispares: levaduras, nematodos, mosca de la fruta y ser humano. Por otra parte, el producto del gen *EIN3* tiene una secuencia parecida a ciertos factores de transcripción, lo que sugiere que participaría en la activación de una serie de genes, que, a su vez, actuarían sobre otros y configurarían así la respuesta fisiológica.

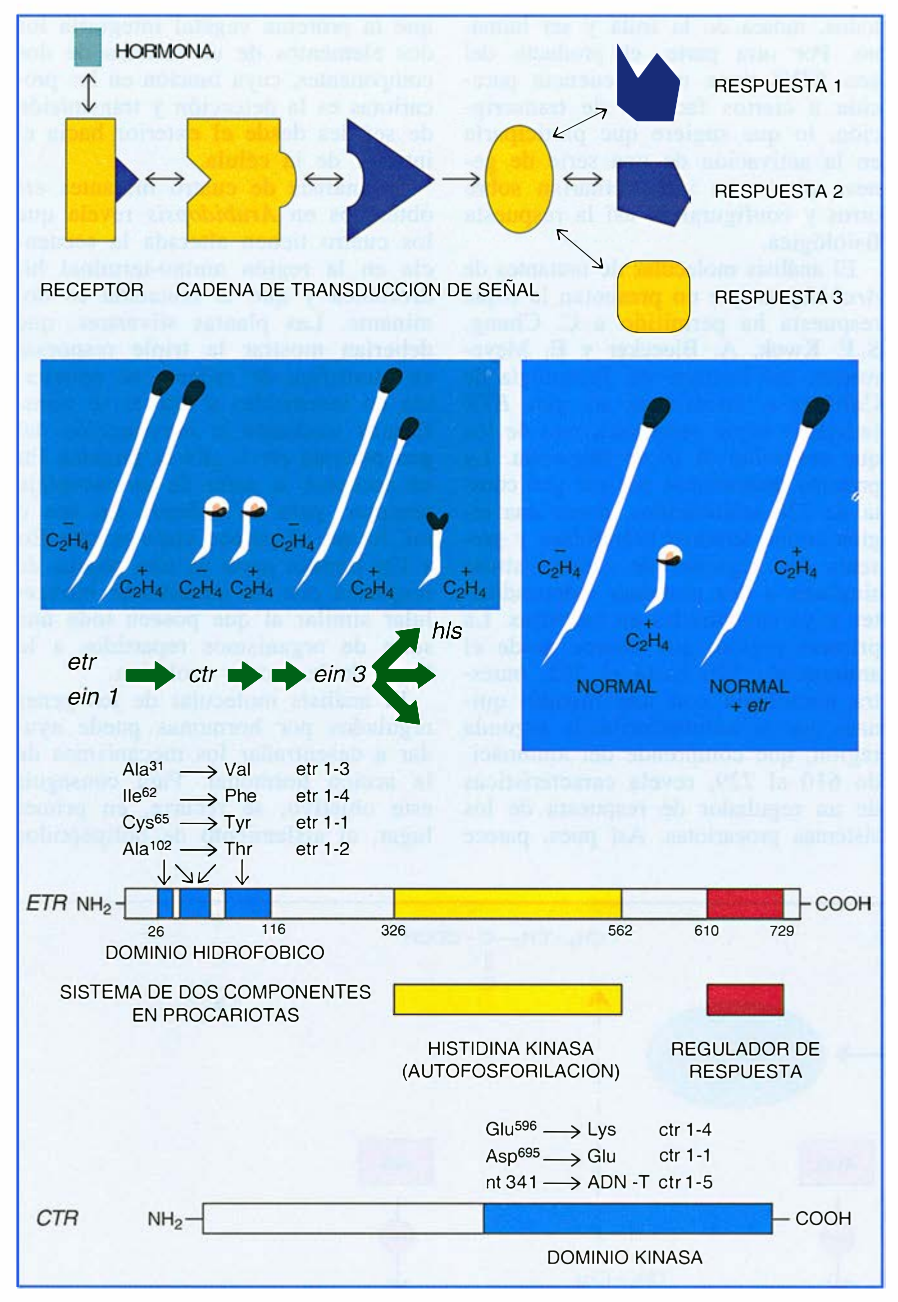
El análisis molecular de mutantes de *Arabidopsis* que no presentan la triple respuesta ha permitido a C. Chang, S. F. Kwok, A. Bleecker y E. Meyerowitz, del Instituto de Tecnología de California, identificar el gen *ETR* (*e*thylene *t*riple *r*esponse), uno de los que controlan la triple respuesta. La proteína determinada por ese gen consta de 738 aminoácidos, posee una región amino-terminal hidrofóbica y presenta dos regiones de características similares a dos proteínas independientes y ya encontradas en bacterias. La primera región, que abarca desde el aminoácido 326 hasta el 562, muestra homología con una histidín quinasa que se autofosforila; la segunda región, que comprende del aminoácido 610 al 729, revela características de un regulador de respuesta de los sistemas procariotas. Así pues, parece que la proteína vegetal integraría los dos elementos de un sistema de dos componentes, cuya función en los procariotas es la detección y transmisión de señales desde el exterior hacia el interior de la célula.

El análisis de cuatro mutantes *etr* obtenidos en *Arabidopsis* revela que los cuatro tienen alterada la secuencia en la región amino-terminal hidrofóbica y que la mutación es dominante. Las plantas silvestres, que deberían mostrar la triple respuesta en atmósfera de etileno, se convierten en insensibles a éste si se transforman mediante la introducción del gen mutante *etr-1*. ¿Es la proteína Etr un receptor, o parte de un complejo receptor, para el etileno? Lo sea o no, lo que sí parece claro es que Etr y Ctr forman parte de una cadena de respuesta con un mecanismo intracelular similar al que poseen toda una serie de organismos repartidos a lo largo de la escala evolutiva.

El análisis molecular de los genes regulados por hormonas puede ayudar a desentrañar los mecanismos de la acción hormonal. Para conseguir este objetivo, se recurre, en primer lugar, al aislamiento de polipéptidos



4. INHIBICION DE LA BIOSINTESIS del etileno. Puede conseguirse por tratamiento con compuestos químicos: aminoetoxivinilglicina (AVG) y ácido α-aminoisobutírico (AIB); también, de forma permanente y desde dentro mediante bloqueo de la expresión de los genes de la biosíntesis del etileno con genes antisentido de la ACC sintasa y ACC oxidasa. Se inhibe, además, por eliminación del precursor (ACC) introduciendo un gen bacteriano que determina la ACC desaminasa.



5. ACCION DE UNA HORMONA VEGETAL. Para su estudio, se parte de la hipótesis, ya demostrada en animales, de que la hormona interacciona con un receptor. La interacción hormona-receptor se transmite a una serie de elementos, que constituyen la cadena de transducción de señal. Las células o tejidos efectores (diana) presentan una respuesta fisiológica, modulada por sus propios factores específicos. La utilización de mutantes en la respuesta de la planta *Arabidopsis thaliana* al etileno (C_2H_4) ha permitido identificar alguno de los elementos de la cadena de transducción de la señal hormonal. Las plantas normales de *Arabidopsis* responden al etileno presentando la triple respuesta: *1*) inhibición del crecimiento del hipocótilo y de la raíz; *2*) engrosamiento del hipocótilo, y *3*) resalte de la curvatura apical. Se emplean diversos tipos de mutantes. Los insensibles al etileno (*etr, ein1 y ein3*) muestran siempre un fenotipo de plántula crecida en ausencia de etileno; los mutantes de respuesta constitutiva (*ctr*) manifiestan la triple respuesta incluso en ausencia de etileno exógeno. Algunos, como el *hls*, desarrollan sólo alguna de las características de la triple respuesta. En experimentos con dobles mutantes se establece luego la secuencia de actuación de los productos génicos. Los genes identificados que forman parte de la cadena de respuesta al etileno parecen tener funciones similares a otros integrados en la cadena de transducción de señal en otros organismos. El análisis de la secuencia del gen *ETR* indica que codifica una proteína que agrupa dos elementos similares al sensor y regulador, presentes como dos proteínas en sistemas de respuesta a señales extracelulares en procariotas. La secuencia de la proteína CTR, a su vez, podría relacionarse con Ser-Thr quinasas del tipo Raf presentes en animales; tal vez forma parte de una cascada de fosforilaciones encargadas de la transducción de la señal hormonal.

y de mensajeros cuya síntesis se induce, o se reprime, por la acción de alguna hormona; en segundo lugar, a la identificación y análisis de las secuencias reguladoras de los genes y de proteínas que se enlazan a las mismas; y, por último, a la introducción, en plantas transgénicas, de los genes específicamente regulados por hormonas, para descubrir su función.

En algunos genes regulados por hormonas se ha demostrado la existencia de elementos de respuesta a hormonas ("hormone responsive elements", o HRE) en la región 5′ del gen, es decir, en la zona del promotor. En el estudio de estos promotores se han definido secuencias, reconocidas específicamente por ciertas proteínas, cuya presencia se requiere para que el gen esté controlado por la hormona. La pérdida de HRE, o la alteración de su secuencia por mutación, provoca la pérdida parcial o total de la sensibilidad a la hormona, por lo que se puede sugerir que actúan a modo de reostatos moduladores de la expresión del gen.

En nuestro laboratorio del Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas, hemos investigado la expresión del gen de una tiolproteasa durante la senescencia de ovarios no polinizados de guisante. La aplicación de giberelinas al ovario evita la senescencia del ovario e impide la expresión del gen de la tiolproteasa; en cambio, promueve la fructificación partenocárpica (desarrollo de frutos sin semillas). Para observar la expresión del gen de la tiolproteasa se construye un gen quimérico, mediante la unión de una secuencia de 1,5 kilobases del extremo 5′ del gen de la tiolproteasa al gen delator *gus* (que codifica la enzima β-glucuronidasa). Una vez introducido el gen quimérico en flores, que expresan transitoriamente el gen de la tiolproteasa, se detecta por el color azul resultante de la actividad de la enzima β-glucuronidasa sobre un sustrato cromogénico que se añade exógenamente. La aplicación de esta técnica a segmentos modificados de ADN permite delimitar las secuencias responsables del control hormonal de la expresión génica.

El estudio de genes regulados por giberelinas y por ácido abscísico ha dado lugar a la identificación de secuencias reguladoras GARE ("gibberellic acid regulatory elements") y ABRE ("abscisic acid regulatory elements"), respectivamente.

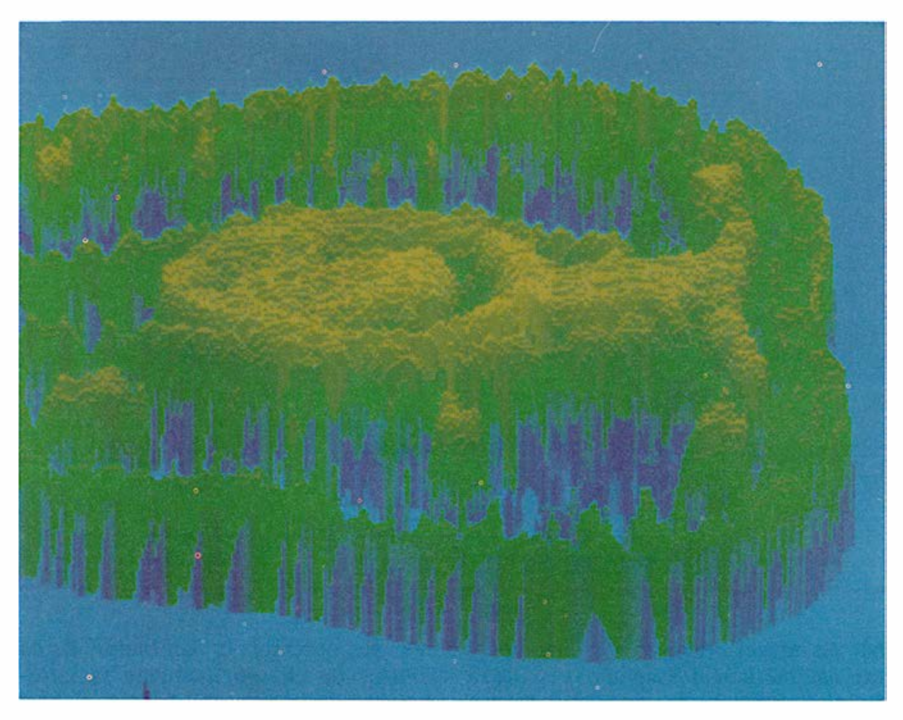
La identificación y análisis de nuevos ARN mensajeros y de proteínas inducidos por hormonas a tiempos muy cortos ha permitido aislar algu-

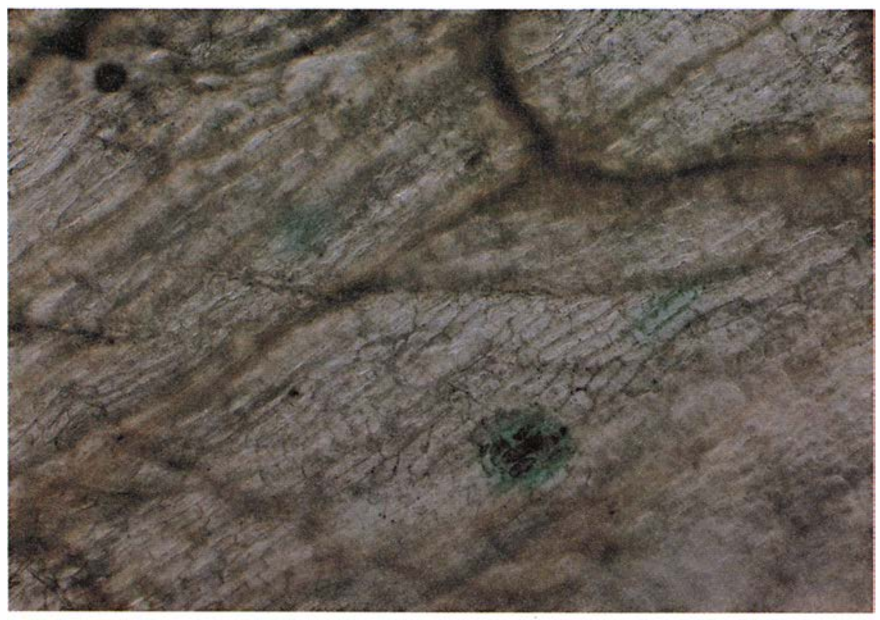
nos de los eslabones de la cadena de transducción de señal de auxinas. Así, en el laboratorio de Theologis se ha demostrado que la expresión de dos genes (*IAA1* e *IAA2*) se activa a los cuatro u ocho minutos por la acción de las auxinas. IAA1 e IAA2 son proteínas nucleares de vida media muy corta (de seis a ocho minutos de vida media) que presentan homología con factores de transcripción encontrados en procariotas. ¿Son estas proteínas el otro extremo de la cadena de transducción de la señal a auxinas?

Conocidas las secuencias de ADN de respuesta a hormonas, podemos investigar en qué células o tejidos se produce la acumulación de una hormona, objetivo difícil de alcanzar por otros métodos; basta con introducir el promotor de un gen regulado por hormonas acoplado a un gen delator. Entre varios ejemplos, Y. Li, G. Hagen y T. J. Guilfoyle, de la Universidad de Missouri, construyeron un gen quimérico utilizando el promotor del gen *SAUR* de soja (gen cuya función se desconoce, aunque se activa por auxinas), ligado a la secuencia codificante del gen *GUS*. Este gen quimérico se introdujo en plantas de tabaco por transformación mediada por *Agrobacterium tumefaciens*. Las células que contenían auxinas activaban el promotor *SAUR* y, por ende, la expresión del gen delator *GUS*, cuya actividad se detectó al añadir un sustrato cromogénico y producirse un color azul.

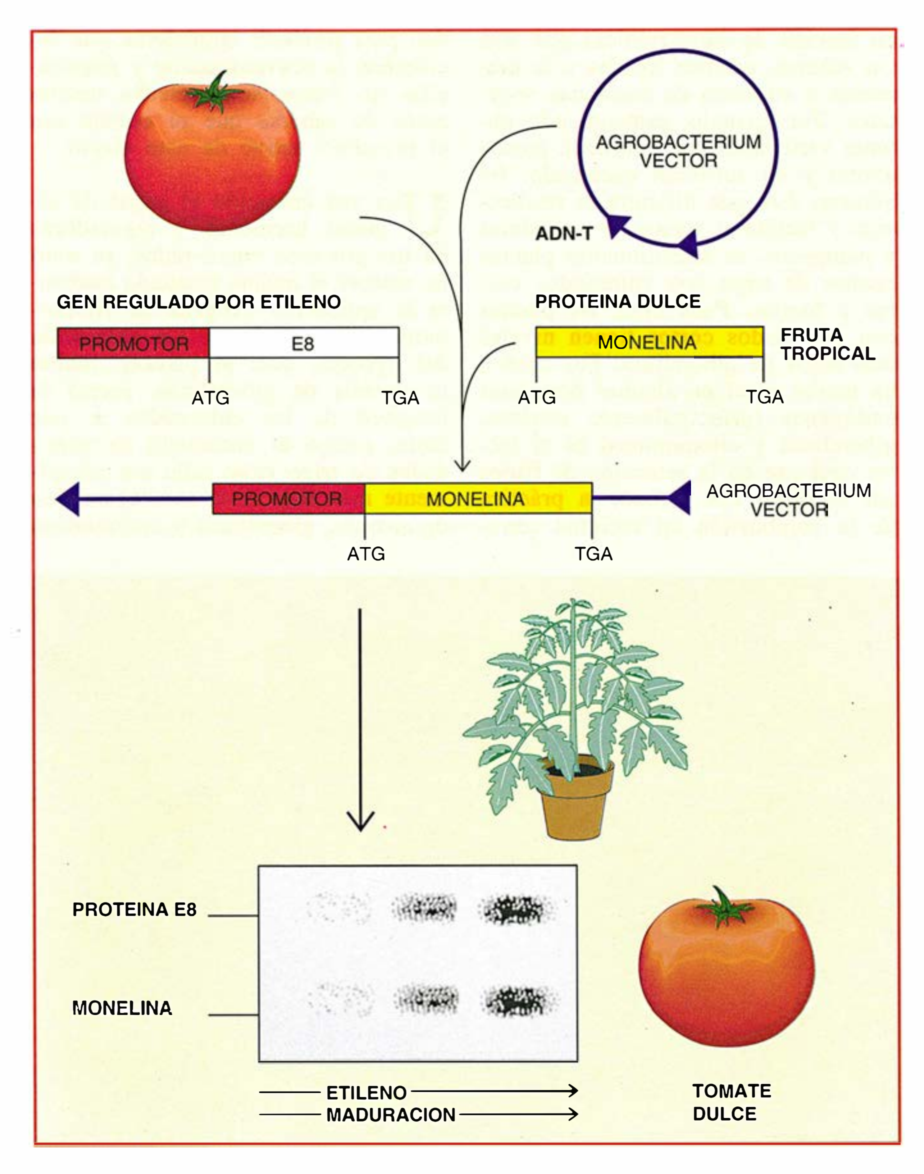
La selección vegetal de especies de interés agrícola se venía haciendo en función de características que, aun sin saberse, estaban ligadas a la presencia o ausencia de hormonas vegetales. Por ejemplo, pretendiendo obtener variedades que exigieran menos abono y no sufrieran encamado, fenómeno éste que dificulta la recolección y facilita el ataque de predadores y patógenos, se seleccionaron plantas enanas de trigo con entrenudos cortos y fuertes. Pues bien, las plantas con entrenudos cortos tienen niveles más bajos de giberelinas. Por contra, un mayor nivel en algunas hormonas endógenas (principalmente auxinas, giberelinas y citoquininas) es el factor operante en la selección de frutos sin semillas. Por último, la práctica de la combustión en recintos cerrados para producir atmósferas que facilitaban la desverdización y maduración de frutos se empleaba mucho antes de saberse que el etileno era el principio activo de este efecto.

Una vez conocido el papel de algunas hormonas y reguladores en los procesos enumerados, se trató de obtener el mismo resultado mediante la aplicación exógena de fitohormonas y reguladores. La aplicación del cycocel, que, al parecer, inhibe la síntesis de giberelinas, acortó la longitud de los entrenudos y, por tanto, redujo el encamado de variedades de trigo cuyo tallo era inicialmente más alto. A su vez, el empleo de auxinas, giberelinas y citoquininas





6. EXPRESION de una tiolproteasa regulada por hormonas en tejidos florales senescentes de guisante. El ARNm de la tiolproteasa se localiza en el óvulo y el endocarpo del ovario, según se aprecia en la fotografía obtenida por N. Harris (*amarillo, arriba*); la detección se realiza mediante una sonda de ARN antisentido que hibrida con el ARNm de la proteasa presente en las células de dichos órganos. El tratamiento del ovario con ácido giberélico reprime su expresión y provoca el desarrollo del fruto. Para estudiar las regiones del ADN responsables de la expresión génica regulada por hormonas, se construye un gen quimérico, que contiene un fragmento de 1,5 kilobases del extremo 5′ del gen de la tiolproteasa y se une a un gen delator (el gen de la β-glucuronidasa de *Escherichia coli*); el conjunto se introduce en las células de pétalos de guisante mediante disparo con una pistola de partículas. Las células que han adquirido el gen quimérico y expresan la tiolproteasa, expresan también la β-glucuronidasa, que se detecta por el color azul que produce con el sustrato cromogénico X-gluc (*abajo*). La fotografía inferior nos ha sido cedida por D. Orzáez.



7. LAS REGIONES REGULADORAS de los genes controlados por hormonas sirven para dirigir la expresión de otros genes en plantas transgénicas. En la figura se muestra la expresión de un gen quimérico constituido por las secuencias reguladoras del promotor del gen *E8* de tomate y por la región codificante del gen de la proteína dulce monelina de la planta tropical *Taumatococcus danielli*. De esta forma, la regulación, durante la maduración del fruto, depende de etileno. Este gen se introduce en plantas de tomate por transformación mediada por *Agrobacterium*. En las plantas transgénicas, tanto la proteína E8 como la monelina se producen durante la maduración del fruto inducida de forma natural por etileno. La presencia de monelina confiere un sabor dulce al fruto de tomate, sin aumentar el nivel de azúcares.

ha permitido mejorar el cuajado y las características (tamaño y calidad en particular) de determinados frutos. También, la utilización de atmósferas de etileno ha sustituido a las prácticas de combustión. Por su parte, la aplicación del fitorregulador ácido abscísico, al provocar la abscisión de las flores del algodón, facilita su recogida. Y, por último, la utilización de hormonas vegetales es decisiva en el cultivo *in vitro*, de importantes repercusiones en la propagación clonal de plantas, en la obtención de plantas libres de virus y en la consecución de metabolitos secundarios de alto valor añadido.

El empleo de hormonas en la agricultura comienza a abordarse desde una nueva perspectiva. Se dispone de técnicas que permiten dirigir los procesos del desarrollo controlado por hormonas desde el interior del vegetal. Estas técnicas son más respetuosas con el medio ambiente, al evitar el uso externo de productos químicos. Recordemos la inhibición de la síntesis de etileno mediante la introducción de genes que dirigen el bloqueo de la producción de las enzimas implicadas en su biosíntesis o reducen el nivel de algunos de sus precursores. Gracias a ello se puede recolectar frutos que no sobremaduran y, por tanto, resisten mejor el transporte, un período de almacenamiento más largo y los efectos de numerosos patógenos que atacan a los frutos sobremaduros. La maduración de estos frutos puede controlarse mediante la aplicación exógena de la fitohormona.

La mejora vegetal recurre también al empleo de promotores de genes regulados por hormonas. La secuencia nucleotídica del promotor se introduce ligada a genes que pueden desarrollar nuevas propiedades. Se puede inducir la actividad de estos genes en el momento de la presencia o ausencia de la hormona, o de su aplicación exógena. L. Peñarrubia, R. Kim, J. Giovannoni, S-H Kim, en el laboratorio de R. Fischer, de la Universidad de California en Berkeley, consiguieron introducir el "sabor dulce" en los tomates sin aumentar su nivel de azúcares, y asegurando que esta característica apareciera a lo largo de la maduración o tras el tratamiento con etileno. Para ello construyeron un gen quimérico con el promotor del gen *E8* (gen de función desconocida, que se activa en frutos de tomate al inicio de la maduración y mediante tratamiento con etileno), seguido de la secuencia de ADN que codifica una proteína de sabor muy dulce, la monelina (aislada de *Taumatococcus danielli*, un fruto tropical).

Las piezas del rompecabezas de las hormonas vegetales están empezando a encajar en un cuadro coherente. Surgen nuevas perspectivas para este capítulo de la fisiología vegetal y la agricultura, algunas convertidas ya en realidades. Un buen ejemplo es la presencia en el mercado del primer tomate transgénico que presenta resistencia a la sobremaduración, fruto de la investigación sobre las bases moleculares de la acción de una hormona vegetal.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FISIOLOGÍA Y BIOQUÍMICA VEGETAL. Dirigido por J. Azcón-Bieto y M. Talón. Capítulos 12 a 17. Interamericana McGraw-Hill, Madrid 1993.

CELLULAR SIGNALING; NEW INSIGHTS INTO THE ACTION OF THE PLANT GROWTH HORMONE AUXIN. M. H. M. Goldsmith. *Proc. Natl. Acad. Sci.* USA, vol 90, páginas 11442-11445, 1993.

THE ROLES OF PHYTOHORMONES IN DEVELOPMENT AS STUDIED IN TRANSGENIC PLANTS. H. J. Klee y C. P. Romano. *Critical Reviews in Plant Science*, vol. 13, págs. 311-324, 1994.

Máseres en el firmamento

Las nubes de gas interestelar producen una intensa radiación coherente de microondas. Esta nos ofrece indicios del tamaño, contenido y distancia de objetos que, sin dicha emisión, serían invisibles

Moshe Elitzur

Hace una treintena de años, los radioastrónomos empezaron a detectar señales que jamás imaginaron. En 1963, un equipo dirigido por Alan H. Barrett, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, descubrió la existencia de unas señales de radio que procedían de nubes del espacio interestelar formadas por moléculas excitadas. Muchos astrofísicos habían sostenido que, en las regiones situadas entre las estrellas, no podían desarrollarse nubes moleculares, pero había, además, otra razón para el asombro. La primera molécula que detectaron, el radical hidroxilo (OH), emitía radiación que parecía contradecir las leyes de la física estadística; las líneas de emisión que debían ser intensas eran débiles, y las que debían ser débiles eran intensas.

En 1965, un equipo dirigido por Harold F. Weaver, de la Universidad de California en Berkeley, detectó radiación con unas propiedades tan insólitas que le pusieron a la sustancia emisora, a falta de una explicación mejor, el sobrenombre de "mysterium". Las microondas que detectaron eran sumamente brillantes, cada línea de emisión cubría un intervalo pequeñísimo de longitudes de onda (en contraposición a los picos más anchos que se habían visto en otras fuentes) y casi toda la radiación estaba polarizada en el mismo sentido, pese a que los fotones de las ondas de luz y de las radioondas que emiten las fuentes astronómicas están, por lo general, polarizados aleatoriamente en diferentes direcciones.

MOSHE ELITZUR se ha dedicado al estudio de los máseres astronómicos y de las nubes de gas que los producen durante más de quince años. Formado en la Universidad Hebrea de Jerusalén y en el Instituto Weizmann de Ciencias, viene enseñando astronomía en la Universidad de Kentucky desde 1980.

No habría de pasar mucho tiempo para que se cayera en la cuenta de que la radiación del "mysterium" no provenía de una nueva molécula, sino que se trataba de una emisión máser procedente del hidroxilo interestelar. (El máser, acrónimo que significa amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación, se había inventado en 1953 y fue el precursor del hoy omnipresente láser.) La pequeña anchura de línea y la polarización fueron los sellos distintivos de los máseres. Sólo una fuente interestelar amplificada podía despedir luminosidad tan intensa. En 1917 Albert Einstein esbozó el mecanismo físico de la emisión estimulada, pero la construcción de dispositivos que pudieran valerse del fenómeno para conseguir la amplificación fue muy ardua; en 1964 Charles H. Townes compartió el premio Nobel en física por la invención del máser.

Desde aquellas primeras observaciones, los radioastrónomos han detectado emisiones de máser procedentes de numerosas moléculas interestelares, entre ellas el vapor de agua, el monóxido de silicio, el metanol e incluso el átomo de hidrógeno (con mucho la sustancia más abundante del universo). Los máseres aparecen en diversidad de fuentes astronómicas, de los cometas a las galaxias.

La amplificación es más sencilla en el espacio

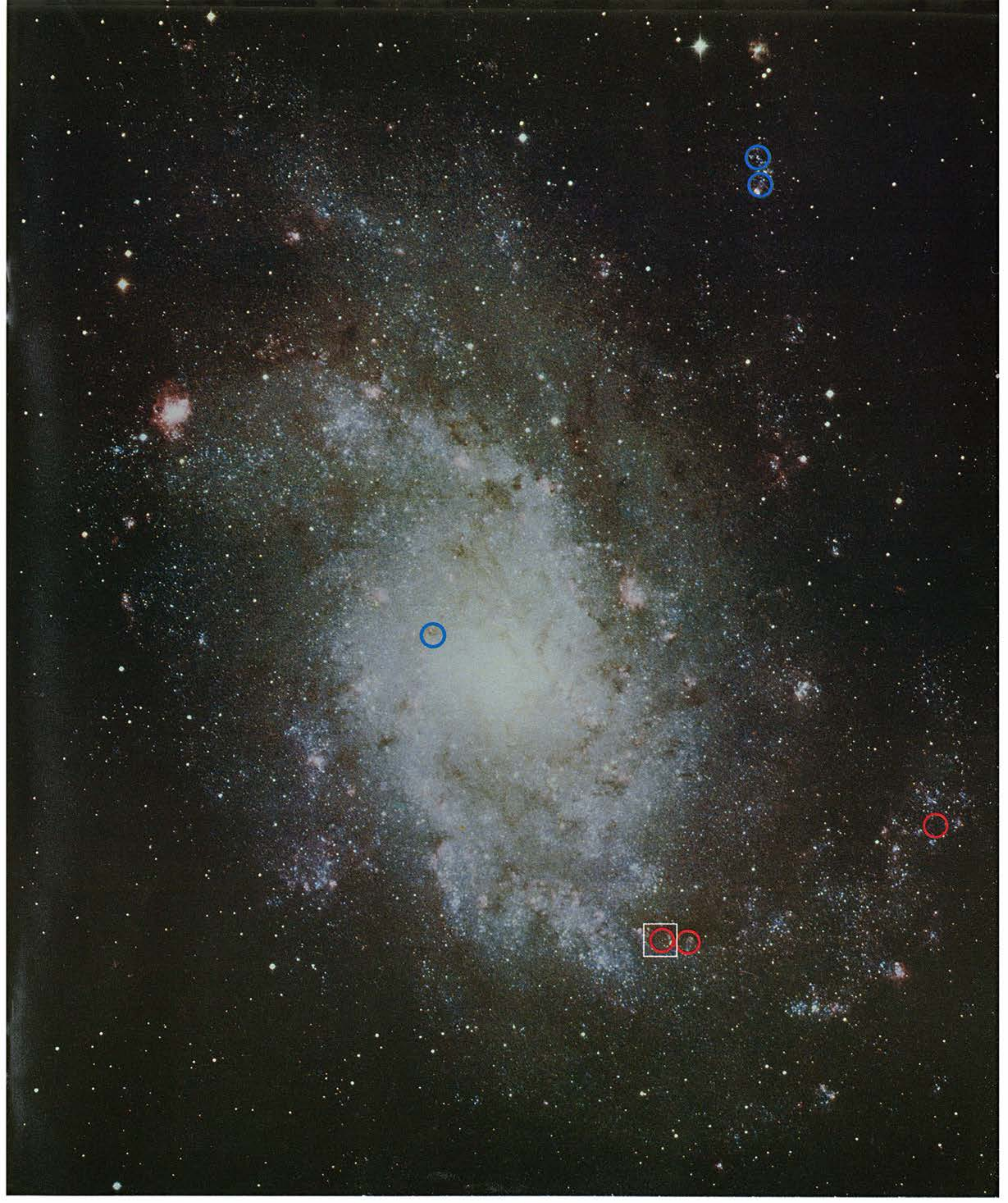
La radiación de los máseres astronómicos, gracias a la resolución sin precedentes de los radiotelescopios modernos, proporciona la única información obtenible sobre la fuente que las produce. Los máseres sólo se forman bajo ciertas condiciones, lo que permite a los astrónomos deducir curvas minuciosas de la presión, temperatura y velocidad del gas. Además, por ser diminutos y brillantes, los máseres se convierten en registros de la estructura a pequeña escala que de otra manera no cabría detectar.

Gracias a una mera coincidencia, las condiciones que requieren los máseres son las que reinan en las nubes circumestelares durante las primeras etapas en la vida de una estrella y durante las últimas. Estas dos fases plantean arduos problemas de evolución estelar, pero la emisión extremadamente brillante de máser proporciona valiosa información sobre ambas.

¿Cómo logran las nubes de gas interestelar crear espontáneamente lo que los físicos tardaron décadas, en sus bien equipados laboratorios, en alcanzar? Máseres y láseres surgen de una condición a la que se da el nombre de inversión de población; en ella, el número de átomos o moléculas que se encuentran en un estado energético superior excede el número de los que están en uno inferior, al contrario de lo que sucede normalmente. Como consecuencia, la reacción de la población invertida a los fotones incidentes invierte también el com-

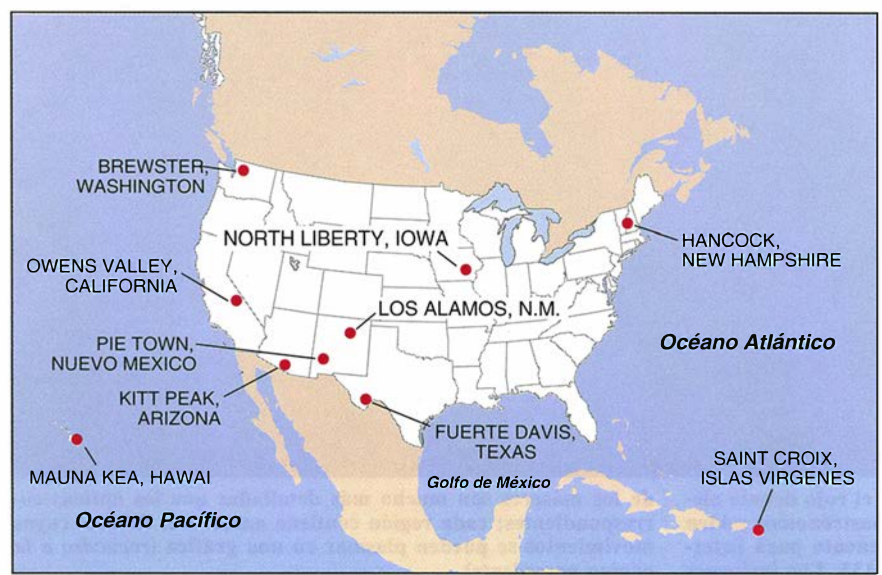


1. LA GALAXIA ESPIRAL M33 alberga al menos seis regiones de máser. (Los colores de los círculos que marcan dónde están los máseres indican su velocidad



después de corregir el movimiento de M33; el rojo denota alejamiento y el azul aproximación.) Los radioastrónomos miden el movimiento de los máseres por el firmamento para determinar la distancia a la que se encuentra M33. Las imágenes de los máseres son mucho más detalladas que las ópticas correspondientes; cada región contiene numerosas fuentes cuyos movimientos se pueden plasmar en una gráfica (*recuadro a la página precedente*).

2. ESTE RADIOTELESCOPIO (*izquierda*), emplazado en el Observatorio de Owens Valley, es uno de los diez que configuran la Red de Base Muy Larga. Distribuida a lo largo y ancho de EE.UU., desde Hawai a las Islas Vírgenes, esta red funciona en realidad como un solo radiotelescopio y produce imágenes con una resolución sin precedentes.



portamiento habitual. Cuando los átomos o moléculas se encuentran con fotones cuya longitud de onda es la adecuada, se desplazan de un estado energético inferior a otro superior. Sin embargo, en las poblaciones invertidas la mayoría de los átomos o moléculas se hallan en el estado energético superior, por lo que responden emitiendo un fotón. De este modo, cada emisión desencadena la expulsión de más fotones y la luz incidente no se absorbe, sino que se amplifica.

Niveles energéticos

Los máseres y láseres de laboratorio suelen producir las inversiones de población de átomos o moléculas desplazándolos entre tres estados energéticos: el estado de fondo, el que normalmente ocupan; un estado superior de corta vida, y un estado intermedio de más larga duración, donde decae el estado superior. Una fuente de energía bombea átomos o moléculas al estado superior, y de allí pasan rápidamente al intermedio. La población del estado intermedio, de mayor duración, aumenta hasta que sobrepasa la del estado de fondo, produciéndose así la inversión de población. Los átomos o moléculas pueden caer del estado intermedio al estado de fondo por medio de la emisión de un fotón, pero esto sucede raras veces si no se estimula la emisión.

Las inversiones de población acontecen también en sistemas más complejos, con cuatro o incluso más niveles de energía por los que se mueven los átomos o moléculas. Casi todos los máseres interestelares presentan configuraciones complejas. En la Tierra es muy difícil producir las inversiones porque cuesta encontrar estados intermedios de larga vida. En un gas a temperatura y presión ambiente, las colisiones obligan a las partículas a repartirse entre los diferentes estados energéticos conforme a la distribución de Boltzmann: la población de los estados de mayor energía decrece exponencialmente. Un átomo o molécula que se halle en un estado de excitación transferirá su energía interna a un vecino de energía menor cuando choque con él; así se va deshaciendo la inversión rápidamente.

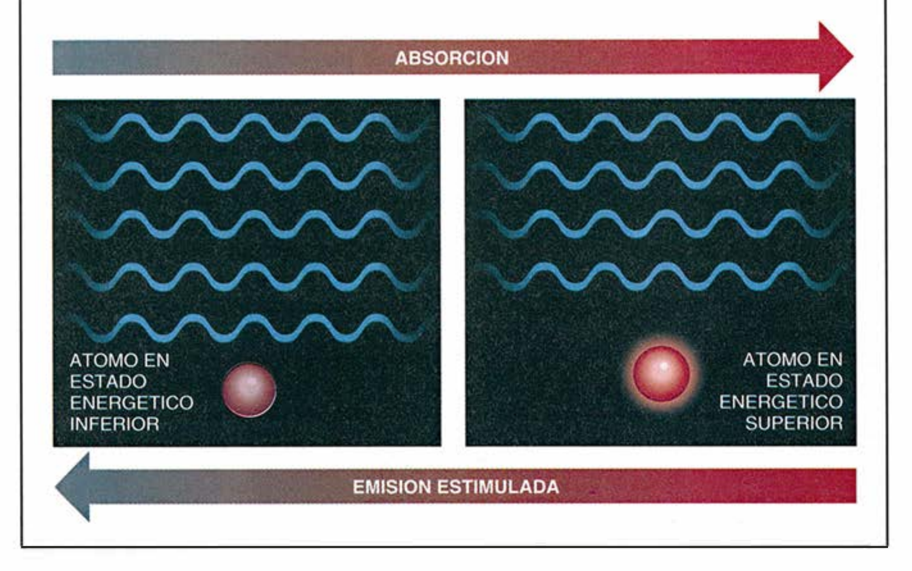
Las desviaciones de este equilibrio, las inversiones de población entre ellas, sólo se producen si la densidad está por debajo de un nivel crítico. La densidad del aire corriente es de aproximadamente 2×10^{19} partículas por centímetro cúbico, pero un máser que opere a las longitudes de onda propias del hidroxilo interestelar sólo puede funcionar con unas 100.000 partículas por centímetro cúbico, unos 100 billones de veces menos. Aunque se puede comparar a los mejores vacíos de laboratorio, esta densidad es bastante alta para el espacio interestelar y sólo se puede encontrar en esas zonas que resaltan en forma de nubes entre las estrellas.

La física de la emisión estimulada

La emisión estimulada, piedra angular del funcionamiento de los máseres, es consecuencia de una propiedad importante de casi todas las leyes físicas que se conocen: la invariancia bajo la reversibilidad temporal. Si se filmase con una cámara de vídeo un proceso microscópico —la colisión de dos moléculas, por ejemplo— sería imposible discernir si la reproducción se está realizando hacia adelante o hacia atrás. (Los episodios macroscópicos no presentan esta invariancia debido al comportamiento estadístico de los sistemas que contienen numerosas partículas.)

Consideremos, en particular, un átomo que pueda residir en uno de dos estados energéticos concretos (*véase la figura*). No habría modo alguno de distinguir entre una secuencia de acontecimientos en la que el átomo absorbe un fotón del campo de radiación circundante y entra en estado de excitación y la interacción en tiempo invertido en la que añade un fotón al campo y pasa al estado energético inferior. Ambos eventos obedecen a las leyes de conservación de energía y, en principio, existen idénticas probabilidades de que suceda uno u otro.

Tanto la absorción como la emisión estimulada requieren un ajuste casi perfecto entre la frecuencia del fotón y la velocidad y niveles de energía del átomo que interacciona. En consecuencia, un átomo estimulado expulsará un fotón idéntico al que causó la emisión. En una nube de gas cuyas partículas se desplacen a velocidad muy parecida, un fotón con una frecuencia y dirección concretas puede convertirse en dos, esos dos en cuatro y así sucesivamente. De este modo, la fuente de fotones que conforma un máser astronómico mantiene una alta coherencia de frecuencia y dirección.



Los máseres aportan una información única

La radiación amplificada proporciona a los observadores una imagen de los objetos astronómicos muy diferente de la que les da la radiación sin amplificar. Las dos características principales son su intensa luminosidad y pequeño tamaño. Los astrónomos miden la intensidad de una fuente de radiación según la temperatura del brillo, vale decir, la temperatura que habría de alcanzar un objeto en equilibrio térmico (el cuerpo negro) para emitir la misma cantidad de radiación a una longitud de onda determinada. La temperatura del brillo de la superficie del Sol asciende a 5800 kelvin aproximadamente, pero la de algunos máseres supera los 10^{15} kelvin.

Un brillo tan espectacular ha de ser producto de una fuerte amplificación. Aunque cualquier volumen con una población invertida amplifica la radiación que se propaga por su interior, la amplificación crece prestamente con el número de partículas que se encuentra un fotón en su camino. Las regiones de máser han de tener una baja densidad con el fin de impedir que aumente la frecuencia de las colisiones y permitir las inversiones de población. En consecuencia, estas regiones habrán de ser enormes (a escala terrestre) si presentan suficientes moléculas para la amplificación. Un máser interestelar típico cubre más de 150 millones de kilómetros, aproximadamente el mismo radio que describe la órbita de la Tierra alrededor del Sol.

Aunque este volumen parezca enorme en comparación con un máser de laboratorio, es minúsculo si lo parangonamos con las distancias interestelares o con el tamaño de muchos de los objetos que se observan con otros medios. Las gigantescas nubes moleculares que albergan regiones de formación estelar suelen medir entre 10 y 100 parsecs de ancho (un parsec equivale a 3,26 años luz, aproximadamente 30 billones de kilómetros). Sus núcleos quizá midan algunos parsecs de ancho, y las regiones de formación estelar propiamente dichas, alrededor de un parsec. Los máseres podrían originarse a partir de un volumen de no más de un billón de kilómetros de ancho, la distancia menor que se puede detectar con otros instrumentos. Un cúmulo de máseres abarca quizás unos cien mil millones de kilómetros, y un máser individual es todavía mil veces más pequeño.

Una de las razones por las que un solo máser ocupa una parte tan restringida de la nube reside en que, en la emisión coherente de máser, tan sólo puede intervenir una fracción pequeña de las moléculas de una región determinada. Debido a que la mayor parte del material de las nubes interestelares participa en movimientos rápidos y turbulentos, muchas moléculas no llegan a interactuar eficazmente con la radiación emitida en un punto. Cuando una molécula en movimiento emite un fotón, el efecto Doppler desplaza la longitud de onda de éste (el mismo efecto también explica los "corrimientos al rojo" de las galaxias distantes que se alejan rápidamente). Si la longitud de onda de un fotón varía en una cantidad que no sea ínfima, la correspondiente, digamos, a un movimiento relativo de 1000 metros por segundo, no podrá estimular a otras moléculas para que radien y no se producirá la amplificación de máser. Por contra, la

amplificación de máser sólo tiene lugar por caminos en los que todas las moléculas desarrollan velocidades bastante parecidas. La mayoría de las fuentes astronómicas de máser intensas se nos aparecen como una multitud de puntitos luminosos, una nube de luciérnagas brillantísimas. Cada punto radia a una frecuencia que corresponde a un desplazamiento Doppler diferente y bien definido, que señala la velocidad del punto con respecto a la Tierra.

Viento estelar

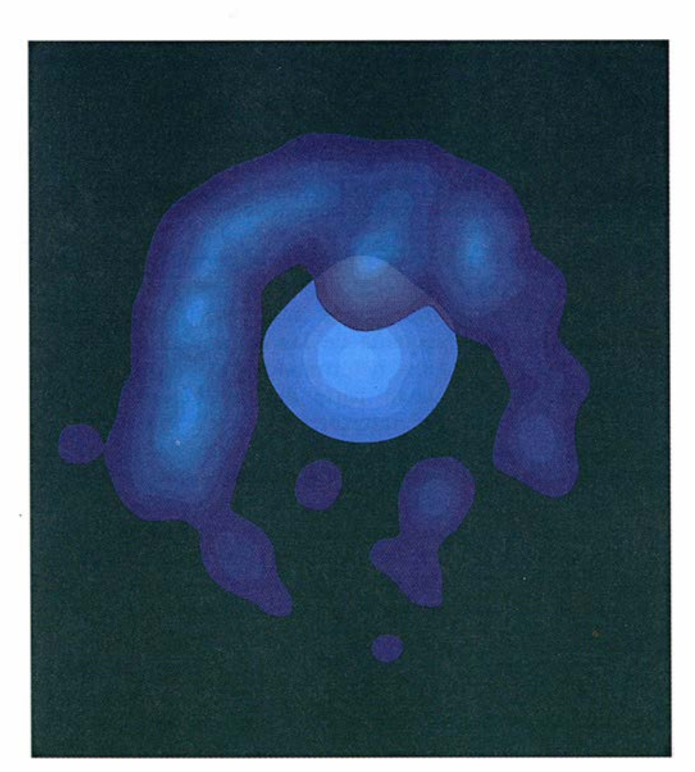
Sin embargo, algunas nubes de gas se mueven de un modo más ordenado: quizás el ejemplo más común sea el viento estelar que se genera en la superficie de una estrella roja gigante. En esta fase tardía de la evolución estelar, las estrellas se desprenden del gas como si fueran grandes globos que perdiesen aire mientras se hinchan hasta alcanzar radios más de mil veces mayores que el de nuestro Sol. (Este se convertirá en una gigante roja dentro de unos cuatro mil millones de años.)

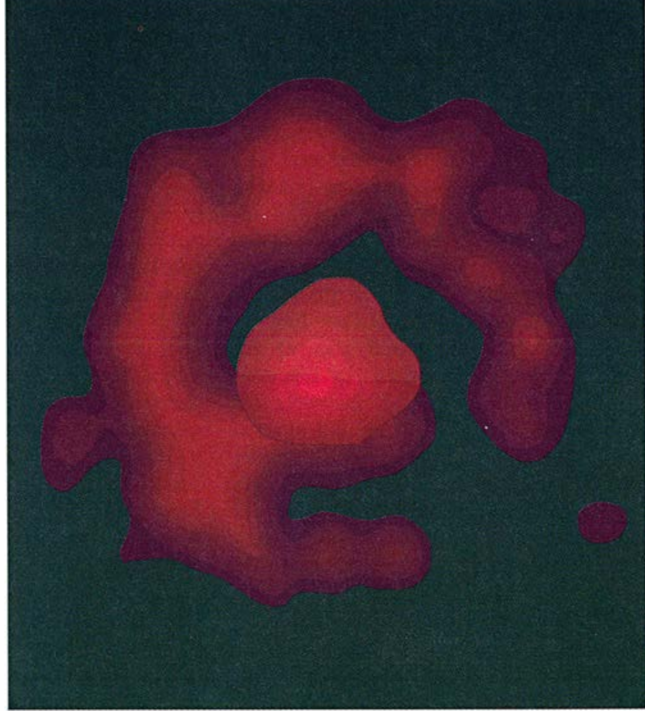
Los vientos estelares contienen abundantes moléculas que emiten radiación máser. Cada molécula de máser posee un conjunto diferente de niveles de energía; cada una emite desde aquella parte del viento estelar donde las condiciones dominantes desencadenan la inversión de población particular que le es propia. Las moléculas de hidroxilo emiten radiación de máser desde una envoltura situada a ciento y pico mil millones de kilómetros de la estrella, unas 25 veces la distancia entre el Sol y Plutón; los máseres de vapor de agua brillan en una región situada a bastante más de diez mil millones de kilómetros de la estrella, y los de monóxido de silicio desde un punto situado justo por encima del borde de su atmósfera. Sintonizando sus receptores a las longitudes de onda de cada máser, los astrónomos pueden investigar los vientos de las gigantes rojas con mayor riqueza de detalle de lo que pueden hacerlo con otras estructuras lejanas.

El gráfico de la intensidad en función de la frecuencia de un máser de hidroxilo tiene, alrededor de una gigante roja, una curva de doble pico muy característica. La separación entre los picos "rojo" y "azul" corresponde a diferencias de velocidad de unos 16 kilómetros por segundo. (Debido a que la radiación es de microondas, no es en puridad ni roja ni azul, pero la terminología parte de los desplazamientos Doppler de la luz visible. El azul está en el extremo de alta frecuencia del espectro e indica que la fuente se aproxima; el rojo pertenece al extremo de baja frecuencia y revela que se aleja.) Este rasgo reviste tal particularidad, que se ha empleado para identificar gigantes rojas en distintos lugares de la galaxia, incluso cuando la emisión óptica de la estrella misma no puede detectarse a causa del polvo.

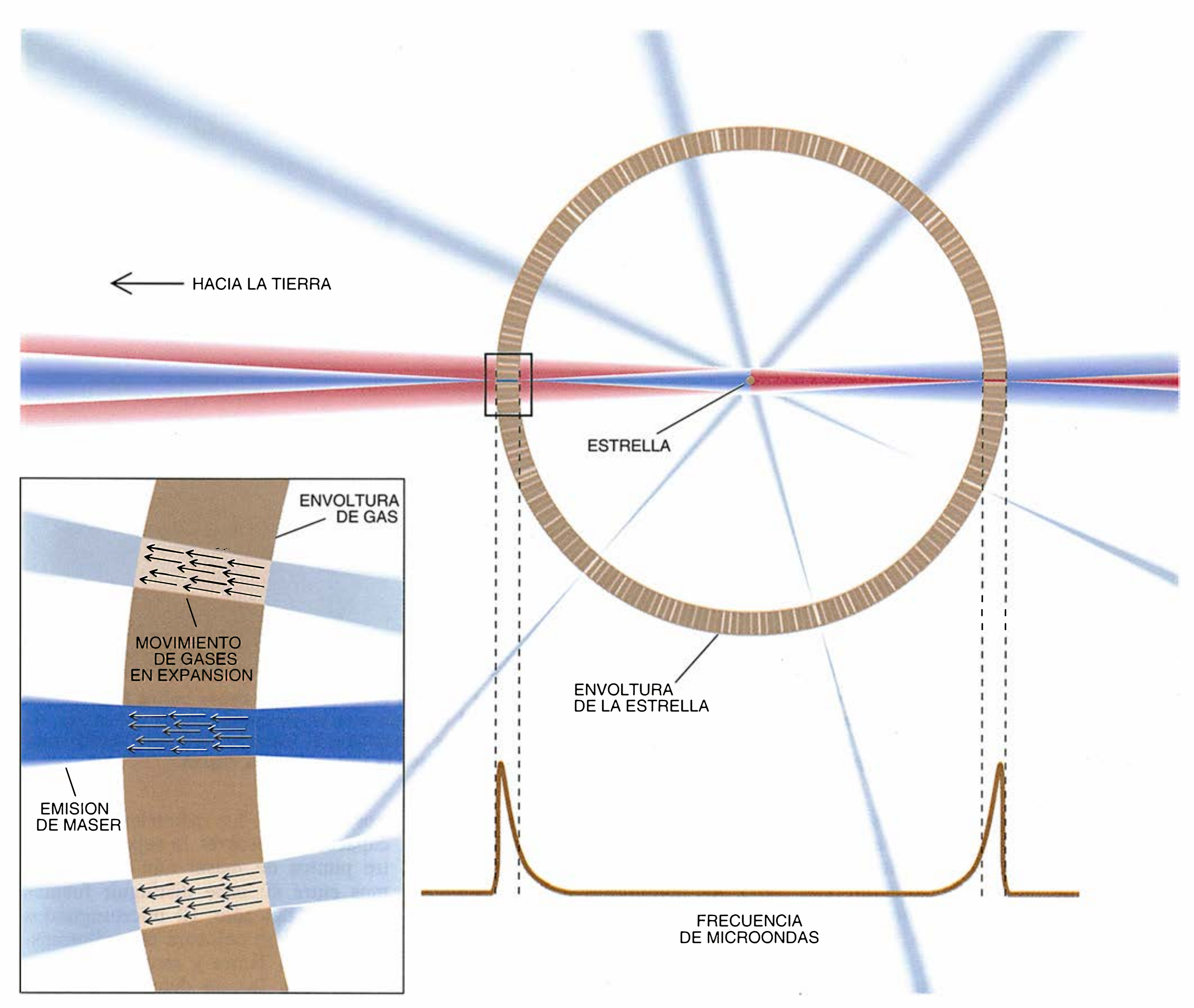
Naturalmente, esta curva se debe al movimiento radial del viento estelar. Las moléculas de hidroxilo de los diferentes sectores de la envoltura se mueven en direcciones diferentes, lo que explica la presencia de grandes velocidades relativas. No pueden interaccionar de forma radiativa. Por el contrario, las moléculas de una determinada línea radial se mueven en la misma dirección, a velocidades parecidas; prácticamente están en reposo unas respecto a las otras. En consecuencia, los fotones emitidos por una molécula afectarán de forma exclusiva a las moléculas que se encuentren en la misma línea, y la amplificación de máser sólo será posible para la radiación que se propague hacia dentro y hacia fuera por una línea que atraviese el centro de la envoltura.

El modelo de emisión de un máser de hidroxilo muestra el aspecto de un erizo, con rayos que sobresalen





3. LAS EMISIONES EN RADIO surgen de una nube de gas en expansión que circunda a una estrella gigante roja. Estas dos imágenes muestran las partes de la nube situadas entre la estrella y la Tierra (*izquierda*) y las zonas de la parte posterior de la estrella (*derecha*). El efecto Doppler produce un corrimiento hacia el azul de los fotones del gas que se aproxima a la Tierra, y un corrimiento hacia el rojo en los del gas que se aleja. La radiación de máser sólo es visible cuando procede de dos casquetes situados directamente en la línea de visión hacia la estrella.



4. LA ENVOLTURA DE UN MASER DE HIDROXILO que circunda a una gigante roja se representa en una vista lateral esquemática. Debido a que la amplificación sólo tiene lugar en una región de gas que se desplaza entera a más o menos la misma velocidad (*recuadro*), la mayoría de las emisiones máser tienen lugar por líneas radiales (aquí aparecen algunas). Por tanto, la única radiación máser que se ve desde la Tierra proviene de dos pequeñas zonas de la envoltura. Las emisiones máser de distintas partes de la envoltura difieren en razón de sus desplazamientos Doppler; el doble pico característico (*abajo*) es un rasgo de las gigantes rojas, observable aun cuando la estrella resulte invisible para los telescopios ópticos.

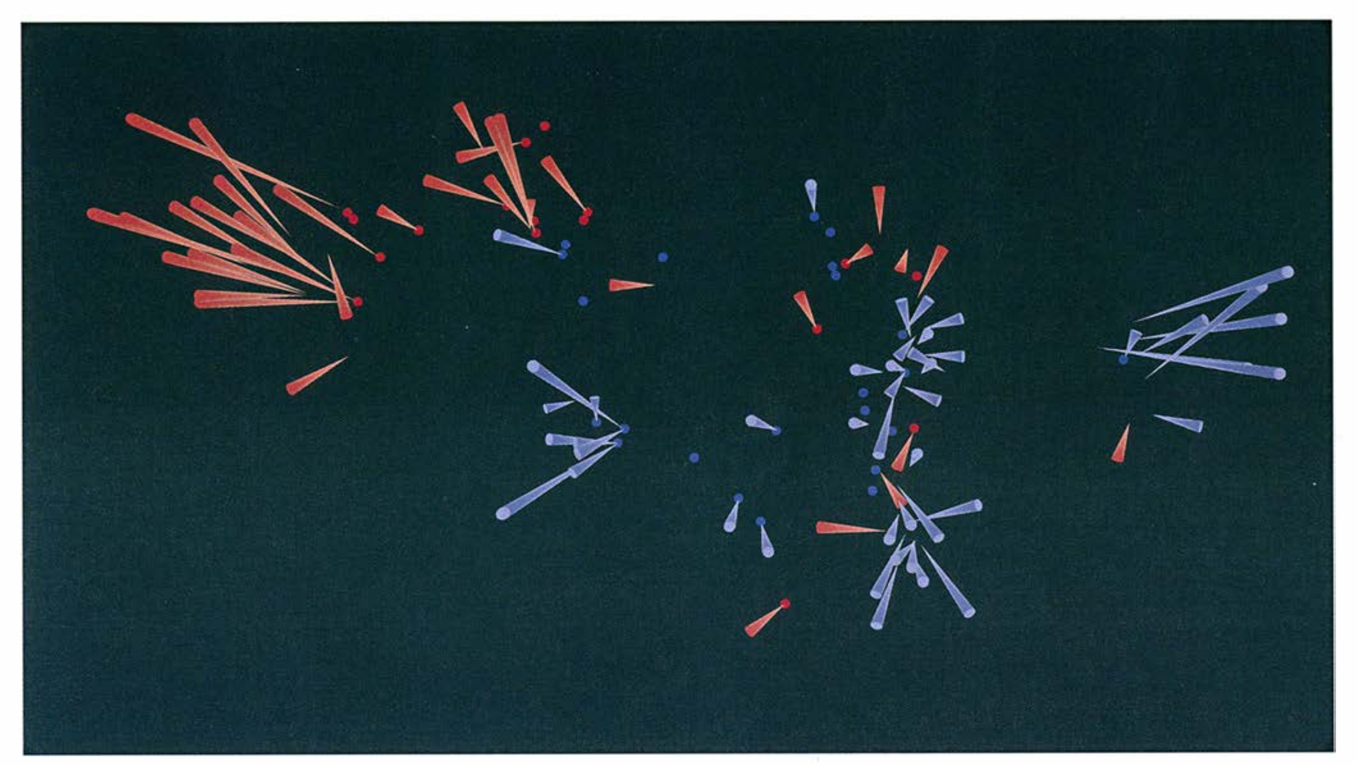
de la nube de gas a la manera de púas. En un punto dado, un observador sólo podrá detectar la emisión de las dos regiones de la envoltura situadas en la línea de visión hacia la estrella central. La señal procedente de la parte anterior presentará corrimiento al azul y la que viene de la parte posterior se desplazará al rojo. Cada una de estas regiones es un pequeño casquete esférico.

Un equipo dirigido por Roy S. Booth, de Jodrell Bank, confirmó esta explicación de forma directa y elegante a través de la observación de la estrella OH127.8. Los investigadores trazaron mapas de los dos picos de emisión de máser y de las "laderas", más débiles, con menor desplazamiento Doppler, que hay entre los picos. Sus mapas muestran que la radiación de los dos picos de intensidad proviene de casquetes compactos, bien definidos, situados en la línea de visión. La radiación más débil de las laderas cubre una región circular mayor, como cabe esperar de una envoltura en expansión. El aspecto incompleto y grumoso de la envoltura refleja las desviaciones de la simetría esférica pura que exhibe la región de máser. Tales irregularidades son de esperar en un viento estelar turbulento.

Una vara astronómica de medir

Además de transmitir los detalles del viento estelar, los máseres de gigantes rojas facilitan información sobre la distancia a que estamos de las estrellas asociadas a ellos. La determinación de las distancias es uno de los problemas más difíciles de la astronomía y, de hecho, la escala de distancias cósmicas sigue sin estar clara. Los astrónomos pueden medir el tamaño angular de los objetos con una precisión exquisita, pero sólo en contadísimos casos consiguen determinar también el tamaño lineal asociado. En las raras ocasiones en que logran medir ambos, la distancia a la fuente se establece directamente: se trata de la razón entre el tamaño angular y el lineal.

Las envolturas de los máseres de hidroxilo que circundan a las gigantes rojas brindan una de esas oportu-



5. UNA REGION DE FORMACION ESTELAR (*arriba*) **que contiene infinidad de máseres emanados de la nube de gas que circunda a una estrella muy joven. A cada uno de los máseres del mapa se le asigna un color según se aproxime a la Tierra o se aleje de ella. La longitud de los conos indica la dirección y la velocidad de cada uno de los movimientos del máser. Al correlacionar las velocidades de los máseres con su movimiento angular, se establece la distancia a la región.**

nidades de oro. Muchas estrellas gigantes rojas experimentan una variación regular del brillo, con períodos de alrededor de un año de duración. La radiación estelar es el motor de la inversión de población de hidroxilo, así que la intensidad del máser debería seguir el modelo temporal de la estrella. Las líneas con desplazamientos al rojo y al azul muestran una variación idéntica, pero la del corrimiento al rojo sufre un retraso de varias semanas, justamente el tiempo que necesita la señal para pasar de la parte posterior de la envoltura a la parte anterior. La duración exacta de este retraso nos da el diámetro de la envoltura. Al medir simultáneamente el diámetro angular de ésta y el retraso entre las señales con corrimiento al azul y al rojo, los astrónomos determinan la distancia que media hasta la estrella. Jaap Herman y Harm J. Habing, del Observatorio de Leiden, han utilizado observaciones de máser para establecer las distancias de varias gigantes rojas de nuestra galaxia, y sugieren la posibilidad de medir las distancias a otras galaxias.

Los radiotelescopios son mucho más apropiados que los telescopios ópticos para realizar tales mediciones, porque resuelven rasgos mucho más diminutos. La resolución angular de los telescopios ópticos está restringida por las distorsiones atmosféricas, y alcanza una meseta, o valor constante, de alrededor de un segundo de arco; los telescopios mayores simplemente recogen más luz. Por el contrario, con cada aumento del tamaño del radiotelescopio se logra una resolución mayor.

Interferometría de base muy larga

Los radioastrónomos han desarrollado diferentes métodos que permiten combinar las señales procedentes de los radiotelescopios que se encuentran dispersos por el globo con el fin de crear una apertura efectiva de más de doce mil kilómetros de ancho. Cuando se aplica esta técnica de Interferometría de Base Muy Larga (VLBI, de las siglas en inglés) a fuentes con líneas de emisión en radio, sólo los máseres presentan la intensidad suficiente y una anchura de línea lo bastante pequeña para correlacionar las señales detectadas por multitud de receptores. La VLBI ha llevado las mediciones astronómicas basadas en la resolución angular a nuevas cotas: se consigue que las imágenes de máser tengan una precisión de 300 microsegundos de arco (si el ojo humano tuviera este poder de resolución, podríamos ver estas palabras a una distancia de 5000 kilómetros). Además, los radiotelescopios son capaces de resolver la separación entre puntos de máser aún más próximos entre sí: cabe distinguir fuentes distantes tan sólo 10 microsegundos de arco. Si se colocara un radiotransmisor en la Tierra y otro en la Luna, a mil años luz se detectarían como dos puntos distinguibles.

Tan extraordinaria precisión respalda la posibilidad de determinar las distancias que nos separan de fuentes de máser que no sean gigantes rojas. Puede que las estrellas jóvenes, cuyo proceso de formación en el interior de las nubes de polvo aún no ha concluido, sean invisibles desde la Tierra, pero los máseres que generan brillan con nitidez en el radiofirmamento. Medir las distancias hasta esas guarderías estelares es más complicado, pues no puede darse por sentado que las fuentes de máser estén dispuestas de forma simétrica dentro de una envoltura esférica en expansión. Para cualquier objeto individual, no hay modo de conocer la relación entre su velocidad a lo largo de la línea de visión y la velocidad transversal que origina su movimiento por el firmamento. Antes bien, los astrónomos se ven obligados a estudiar un cúmulo de fuentes de máser para, a continuación, generar ecuaciones que relacionen las velocidades de todos los miembros del cúmulo. Una vez

determinados los movimientos relativos, se correlacionan las velocidades angulares y los desplazamientos Doppler con vistas a determinar la distancia más probable al cúmulo.

Al trabajar con la VLBI de alta resolución, en sólo unos meses los astrónomos logran detectar los movimientos aparentes de los máseres; para rastrear una fuente óptica hacen falta décadas. Un grupo del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, dirigido por James M. Moran y Mark Reid, ha realizado las primeras observaciones del movimiento de los máseres de vapor de agua. Las velocidades angulares que midieron se han comparado al crecimiento de las uñas de un astronauta en la Luna o al movimiento de unos caracoles en Júpiter.

Carl R. Gwinn, de la Universidad de California en Santa Bárbara, creó hace poco un mapa del máser más luminoso de nuestra galaxia, una región de formación estelar cuyo nombre es W49(N). El mapa señala las posiciones de cada elemento de máser de vapor de agua e indica su posición futura más probable, así como su velocidad de aproximación y de alejamiento. La dispersión de velocidades y direcciones deja claro que el cúmulo de máseres se encuentra en expansión desde un centro común; con estos datos se puede pergeñar un modelo de la estructura tridimensional completa del campo de velocidad. La estimación de Gwin indica que el cúmulo reside a una distancia de 10,4 kiloparsecs, con una incertidumbre de 1,3 kiloparsecs.

El grupo ha empleado este mismo método para describir los movimientos de un máser de vapor de agua en Sagitario B2(N), una región de formación estelar muy cercana al centro de nuestra galaxia. Los puntos de máser se hallaban dispersos por un área de 0,3 años luz de ancho, a unos ocho kiloparsecs (25.000 años luz) de la Tierra. Esta cifra es la única medida directa que existe de la distancia que media al centro de la galaxia y ha sido adoptada por la Unión Astronómica Internacional.

En 1993, miembros del grupo de Harvard publicaron datos de las primeras mediciones de los movimientos de un máser de vapor de agua en otra galaxia, concretamente en la M33. En el futuro próximo esperan poder calcular la distancia de la galaxia, eliminando algunas fuentes de error importantes en la escala de distancias cósmicas. En fecha reciente, han trazado mapas de fuentes de máser en M106, una galaxia espiral más lejana. El análisis de la rotación de las fuentes de máser alrededor de su centro común sugiere una cifra preliminar de 5,4 megaparsecs (17,6 millones de años luz).

Una visión lejana

A diferencia de otros científicos, los astrónomos no podemos ni manipular ni tocar los objetos que estudiamos. La única información que recogemos sobre los cuerpos celestes, salvo los que se encuentran en el sistema solar, proviene de la radiación que emiten. Cuando se logra detectarla, la radiación máser proporciona datos únicos sobre las estructuras interestelares y permite la observación de fenómenos astrofísicos a pequeña escala que no podríamos ver de ninguna otra manera.

El progreso incesante en el campo de las técnicas interferométricas posibilita la exploración de detalles de tamaño decreciente. Los radioastrónomos estadounidenses inauguraron hace poco la Red de Base Muy Larga (*Very Long Baseline Array*), tejida por diez telescopios idénticos, distribuidos por el territorio de su país desde Hawai a las Islas Vírgenes. La red, que se dedicará a las observaciones interferométricas, funciona como un solo instrumento, dotado de extraordinaria capacidad de resolución.

En la actualidad, radioastrónomos de Japón y Rusia trabajan en la puesta en marcha de redes de VLBI aún más ambiciosas, que incluyen la puesta en órbita de un telescopio espacial. La terminación de la Red de Base Muy Larga y las perspectivas de la interferometría espacial aseguran una continua mejora en la resolución de estos "microscopios interestelares". Los estudios de máseres seguirán (como las fuentes que observan) expandiéndose y proporcionando datos insustituibles sobre el funcionamiento interno de las nubes interestelares y la evolución de estrellas y galaxias remotas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COMPACT MASER SOURCES. R. J. Cohen, en *Reports on Progress in Physics*, vol. 52, n.º 7, págs. 881-943; julio de 1989.

ASTRONOMICAL MASERS. M. J. Reid y J. M. Moran, en *Galactic and Extragalactic Radio Astronomy*. Dirigido por G. L. Verschuur y K. I. Kellerman. Springer-Verlag, 1991.

ASTRONOMICAL MASERS. M. Elitzur. Kluwer Academic Publishers, 1992.

ASTROPHYSICAL MASERS. Dirigido por A. W. Clegg y G. E. Nedoluha. Springer-Verlag, 1993.

La historia de la testosterona sintética

Desde hace años está prohibida la administración de testosterona para reforzar el rendimiento deportivo. Muy pronto, sin embargo, podría recomendarse en medicina a la par que otras terapias hormonales legítimas

John M. Hoberman y Charles E. Yesalis

El 1 de junio de 1889, Charles Edouard Brown-Séquard, destacado fisiólogo francés, anunciaba en la Sociedad de Biología de París que había ideado una terapéutica rejuvenecedora del cuerpo y la mente. Afirmó que, a sus 72 años, había invertido su propio declive inyectándose un extracto líquido derivado de los testículos de perros y conejillos de Indias. Estas inyecciones, anunció, habían aumentado su potencia física y su energía intelectual, aliviado su estreñimiento e incluso alargado el arco de la micción.

Casi todos los expertos, entre ellos algunos contemporáneos del conferenciante, coincidieron en que estos efectos positivos se debieron al poder de sugestión, pese a las refutaciones de Brown-Séquard. Sí estaba en lo cierto al proponer que las funciones testiculares podrían potenciarse o restaurarse mediante sustitución de las sustancias que las gónadas producen. Su logro consistió, pues, en convertir la idea de la "secreción interna", avanzada en 1855 por Claude Bernard, en la base de una técnica de "sustitución" organoterapéutica. Por su intuición de que las secreciones internas podrían actuar como reguladores fisiológicos (llamados hormonas en 1905), Brown-Séquard pasó a ser uno de los fundadores de la endocrinología moderna. Así empezó una era de tratamientos hormonales cada vez más complejos que llevó a la síntesis, en 1935, de la testosterona, principal hormona masculina producida por los testículos.

Desde entonces, la testosterona y sus derivados primarios, los esteroides androgénicos anabolizantes, han llevado una curiosa doble vida. Desde los años cuarenta, incontables deportistas de elite y culturistas han tomado estos fármacos para desarrollar su masa muscular e intensificar los regímenes de entrenamiento. A lo largo del último cuarto de siglo, esta práctica se ha mantenido oficialmente proscrita, aunque viva en un mercado negro internacional de mil millones de dólares.

Se conoce menos el amplio uso terapéutico concedido en medicina clínica a los productos derivados de la testosterona. La verdad es que, medio siglo atrás, parecía que la testosterona iba camino de convertirse en el tratamiento de rutina para los varones entrados en años; mas, por razones diversas, no consiguió ese estatuto "legítimo" en el mercado. Tal vez los médicos temieran los efectos secundarios, virilizantes, que tales fármacos solían conllevar en su administración a las mujeres: voz más ronca e hirsutismo.

Pero comienzan a menudear las pruebas de que la frontera que separa el uso "legítimo" del "ilegítimo" de la testosterona se está difuminando. Se investigan ahora los riesgos y la eficacia clínica de los esteroides androgénicos anabolizantes. En particular, se estudia la gravedad real de ciertos efectos colaterales transitorios a corto plazo, denunciados; así, una mayor agresividad, deterioro de la función hepática y la aparición de problemas reproductores. Algunos médicos tratan ya con testosterona un número cada vez mayor de varones de edad avanzada para potenciar su fuerza física, libido y sensación de bienestar. Nosotros nos limitaremos a describir la historia de la hormonoterapia masculina que ha culminado en la perspectiva de una terapia de testosterona para millones de personas.

Brown-Séquard proporcionó muestras gratis de este *líquido testicular* a los médicos dispuestos a probarlo. La oferta generó una ola de experimentos internacionales encaminados a curar un amplísimo abanico de alteraciones: tuberculosis, cáncer, diabetes, parálisis, gangrena, anemia, arteriosclerosis, gripe, enfermedad de Addison, histeria y migraña, entre otras. La nueva ciencia de los extractos animales hundía sus raíces en la vieja creencia de los *similia similibus*, es decir, del tratamiendo de un órgano por otro idéntico. Durante siglos, los médicos habían prescrito la ingestión de tejido cardiaco humano o animal para producir valor, el consumo de sesos para curar la idiocia y la toma, poco apetecible, de secreciones y partes del organismo (bilis, sangre, huesos, heces, plumas, cuernos, intestino, placenta y dientes) para mejorar achaques relacionados.

Los órganos sexuales y sus secreciones ocupaban un lugar preferente en esa extraña galería terapéutica. Los egipcios concedían poderes medicinales a los testículos; Plinio el Viejo indicaba, en el siglo primero, que el pene de un asno remojado en aceite o el de una hiena cubierto con miel actuaban de fetiches sexuales. El *Ayurveda* de Susruta (hacia el 1000 a.C.) recomendaba la ingestión de tejido testicular para sanar la impotencia. Mesuë el Viejo (777-857 d.C.) prescribía una especie de extracto testicular como afrodisíaco. La *Pharmacopoea Wirtenbergica*, recetario alemán publicado en 1754, menciona, entre los ingredientes, testícu-

1. VASILY STEPANOV, peso ligero soviético, entrenando en 1955. Muchos levantadores de pesos de la antigua Unión Soviética empezaron a tomar testosterona sintética para reforzar su vigor antes de que lo hicieran sus competidores occidentales. En los Campeonatos Mundiales de 1954 el médico del equipo soviético le comentó a John Ziegler, preparador norteamericano, la eficacia de esos fármacos. Ziegler los ensayó entonces en sí mismo y en varios atletas estadounidenses.

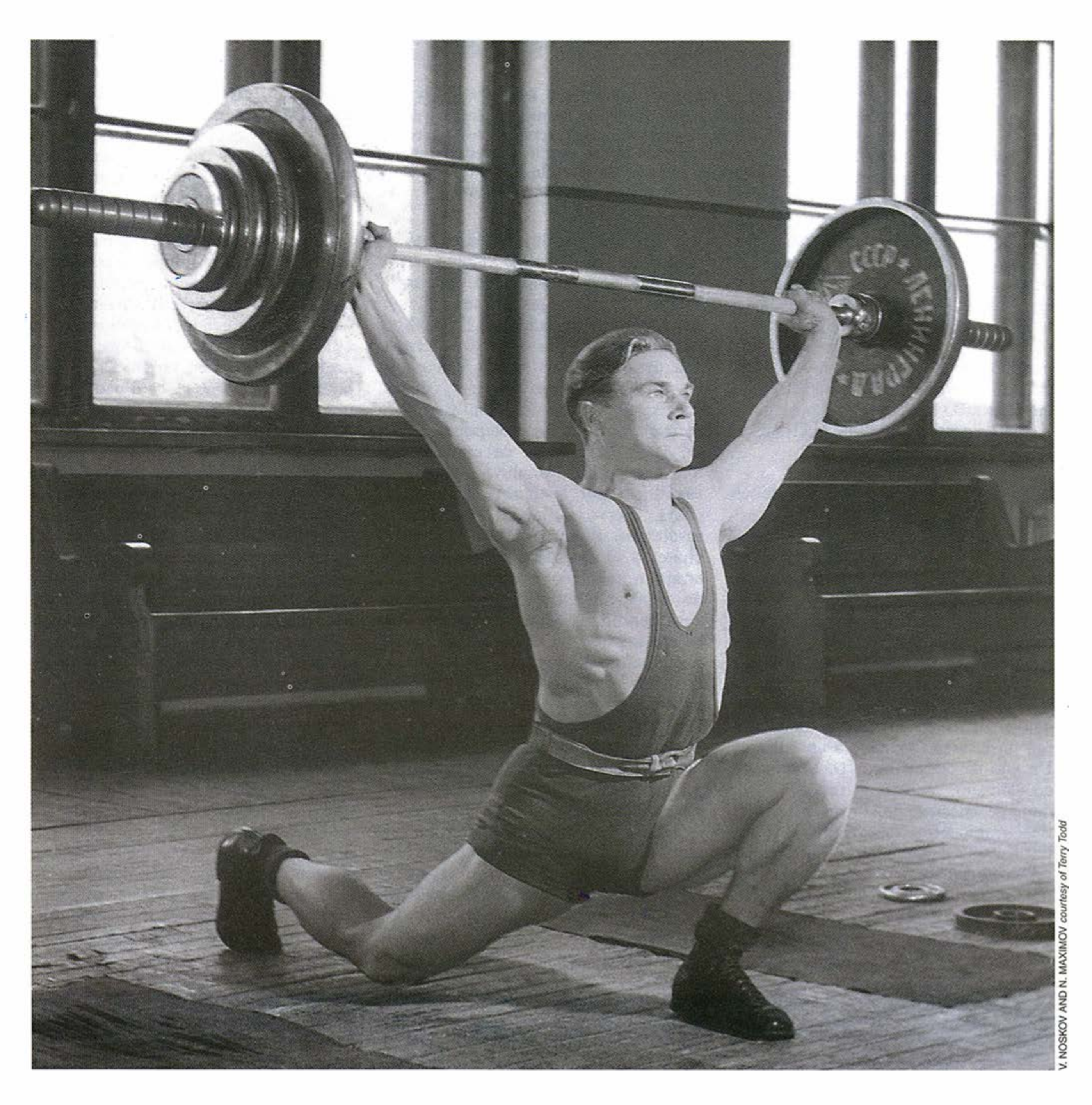
los de caballo y falos de animales marinos. Estos exóticos objetos terapéuticos dan fe de la imposibilidad, para los antiguos y los modernos, de separar el mito sexual de la biología.

En la obra de Brown-Séquard se inspiraron Oskar Zoth y Fritz Pregl; este último acabó decantándose por la química analítica y recibió el premio Nobel en 1923. Cuando la fisiología deportiva estaba en pañales, ambos fisiólogos australianos investigaron si los extractos testiculares aumentaban la potencia muscular y mejoraban el rendimiento atlético. Se autoinyectaron un extracto líquido de los testículos de toro y luego midieron la fuerza de sus dedos medios. Un ergógrafo Mosso registró la "curva de fatiga" de cada serie de ejercicios.

En un artículo publicado en 1896, Zoth llegaba a la conclusión de que el extracto "orquítico" había mejorado no sólo la fuerza muscular, sino también el estado del "aparato neuromuscular". La mayoría de los científicos diría hoy que éstos eran efectos placebo, una posibilidad que los experimentadores consideraron y rechazaron. Con todo, encierra un innegable interés histórico el párrafo que cerraba el artículo: "El entrenamiento de los deportistas ofrece una oportunidad de investigación ulterior en esta área y permite hacer una valoración práctica de nuestros resultados experimentales." Por vez primera, se proponía inyectar una sustancia hormonal a los deportistas.

La creciente popularidad de los extractos masculinos promovió la bús-

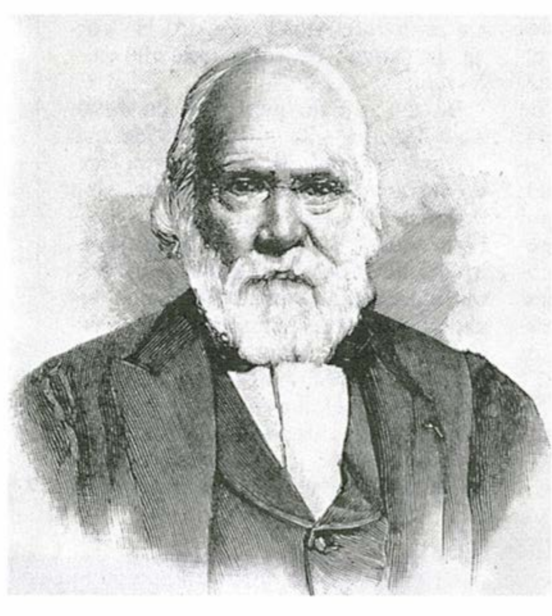
JOHN M. HOBERMAN y CHARLES E. YESALIS comparten un mismo interés por la historia de los fármacos potenciadores del rendimiento. Hoberman, profesor de la Universidad de Texas, tiene varias publicaciones sobre la historia de la medicina deportiva. Yesalis, que enseña en la estatal de Pennsylvania, estudia el uso no médico de los esteroides androgénicos anabolizantes.



V. NOSKOV AND N. MAXIMOV courtesy of Terry Todd

queda de su componente activo. En 1891, Alexander von Poehl separó cristales de fosfato de espermina, observados en el semen humano por Anton van Leeuwenhoek en 1677 y redescubiertos por los científicos europeos en los decenios de 1860 y 1870. Poehl afirmó, con acierto, que la espermina aparece en tejidos masculinos y femeninos y llegó a la conclusión de que aumentaba la alcalinidad del torrente sanguíneo, elevando así la capacidad de la sangre para transportar oxígeno.

Esta fue una observación interesante, por cuanto la hemoglobina recoge el oxígeno en un ambiente ligeramente alcalino y lo libera cuando el *p*H es algo ácido; pero incorrecta, pues ninguna sustancia química media la unión del oxígeno a la hemoglobina. Sin embargo, el químico ruso creyó haber mejorado el trabajo de Brown-Séquard, ya que, si la espermina aceleraba el transporte de oxígeno, podía reclamar el estatuto de sustancia "dinamogénica", con potencial ilimitado para intensificar la vitalidad del organismo humano. Ahora bien, la función de la espermina permaneció desconocida hasta 1992, cuando el equipo de Ahsan U. Khan, de Harvard, anunció que protege al ADN contra los efectos nocivos del oxígeno molecular.



2. CHARLES EDOUARD BROWN-SEQUARD afirmaba haber invertido su propio proceso de envejecimiento inyectándose extractos de testosterona. No es posible que las inyecciones le rejuvenecieran, como declaraba, pero su perspicacia le valió el título de fundador de la endocrinología moderna.

Entre el florecimiento de la teoría de la espermina, antes de la primera Guerra Mundial, y la síntesis de testosterona, veinte años más tarde, surgió en la bibliografía médica, y enriqueció a algunos, otra terapia con glándula sexual: el trasplante de material testicular humano y animal en pacientes afectados de lesión o disfunción de las glándulas sexuales, iniciado al parecer en 1912, cuando dos médicos de Filadelfia trasplantaron un testículo humano a un paciente. Un año después, Victor D. Lespinasse, de Chicago, extirpó un testículo a un donante anestesiado, lo diseccionó en tres fragmentos transversales y los insertó en un paciente con disfunción sexual que había perdido los dos testículos. A los cuatro días, "el paciente tuvo una fuerte erección acompañada de un notable apetito sexual. Dos años después, la capacidad sexual del paciente seguía intacta y Lespinasse describió la operación como una intervención clínica "absolutamente perfecta".

El más intrépido de estos cirujanos fue Leo L. Stanley, médico de la prisión de San Quintín. Stanley estuvo al frente de una población, extensa y estable, de donantes de testículos y de receptores impacientes. Empezó en 1918 trasplantando testículos extirpados de prisioneros recién ejecutados en presidiarios de diversas edades, varios de los cuales confesaron la recuperación de la potencia sexual. En 1920 "la escasez de material humano", escribió Stanley, le indujo a sustituirlo por testículos de carnero, cabra, ciervo y jabalí, con buenos resultados. Realizó cientos de operaciones y el favorable testimonio oral atrajo a muchos pacientes en busca de tratamiento para diversas alteraciones: senilidad, asma, epilepsia, diabetes, impotencia, tuberculosis, paranoia, gangrena y otras. Al no haber encontrado efectos adversos, llegó a la conclusión de que "la sustancia testicular animal inyectada en el organismo humano ejerce efectos indudables", entre ellos "el alivio del dolor de origen incierto y la promoción del bienestar corporal".

Semejante organoterapia lindaba con la frontera del curanderismo. Pero el trabajo de Stanley mereció aparecer en la revista *Endocrinology.* Igual que Brown-Séquard, se quejaba de "los charlatanes de 'la virilidad perdida'" y los "bucaneros médicos" que navegaban por "este mar poco explorado de la investigación" en un estado de media ceguera y persiguiendo el lucro en vez del progreso médico. Con todo, el propio Stanley realizó operaciones sin vacilar y se dejó convencer por pruebas muy ambiguas. Por no hablar de los controvertidos trasplantes "de glándula de mono" realizados por Serge Voronoff durante los años veinte que devengaron a este cirujano ruso-francés una considerable fortuna.

En una elogiosa monografía retrospectiva, David Hamilton aboga por la sinceridad de Voronoff en una época en que la endocrinología era un campo nuevo y los comités éticos, pocos y distantes. Aunque las revistas médicas lanzaban avisos regulares contra el "tráfico de prodigios", "la dosificación pluriglandular a la buena de Dios" y "las extravagantes excursiones terapéuticas", expresaban también cierto cauto optimismo. Dado el conocimiento limitado y las tentaciones terapéuticas de esta era, tales tratamientos entraban mejor en la medicina de vanguardia que en la consideración de fraude.

Antes de que Stanley y sus colegas los cirujanos iniciaran las operaciones de trasplante, otros habían empezado a buscar una sustancia dotada de propiedades andrógenas. En 1911, A. Pézard descubrió que la cresta de un capón macho crecía en proporción directa a la cantidad de extractos testiculares que les inyectaba al nacer. Durante los veinte años siguientes, los investigadores utilizaron ésta y pruebas animales similares para determinar los efectos androgénicos de diversas sustancias aisladas de grandes cantidades de testículos animales o de orina humana. La búsqueda entró en su etapa final en 1931, cuando Adolf Butenandt aisló 15 miligramos de androsterona, una hormona masculina no testicular, de 15.000 litros de orina de policías. En los siguientes años, varios trabajos confirmaron que los testículos contenían un factor androgénico más potente que el de la orina, la testosterona.

Tres equipos de investigación iniciaron la carrera para aislar la hormona y publicar sus resultados. El 27 de mayo de 1935, el equipo de Karoly Gyula David y Ernst Laqueur, subvencionados por la compañía farmacéutica Organon de Oss, presentaron "Sobre la hormona masculina cristalina procedente de los testículos (la testosterona)", un trabajo clásico en la historia del género. El 24 de agosto, una revista alemana recibió un artículo de Butenandt y G. Hanisch, subvencionados por los laboratorios Schering de Berlín, en el que describían

"un método para preparar la testosterona a partir de colesterol". Y el 31 de agosto entraba en la redacción de *Helvetica Chimica Acta* el trabajo "Sobre la preparación artificial de la hormona testicular testosterona (androsteno-3-ona-17-ol)", firmado por Leopold Ruzicka y A. Wettstein; en él anunciaban la solicitud de patente en nombre de Ciba. Butenandt y Ruzicka acabaron compartiendo el premio Nobel de química en 1939 por este descubrimiento.

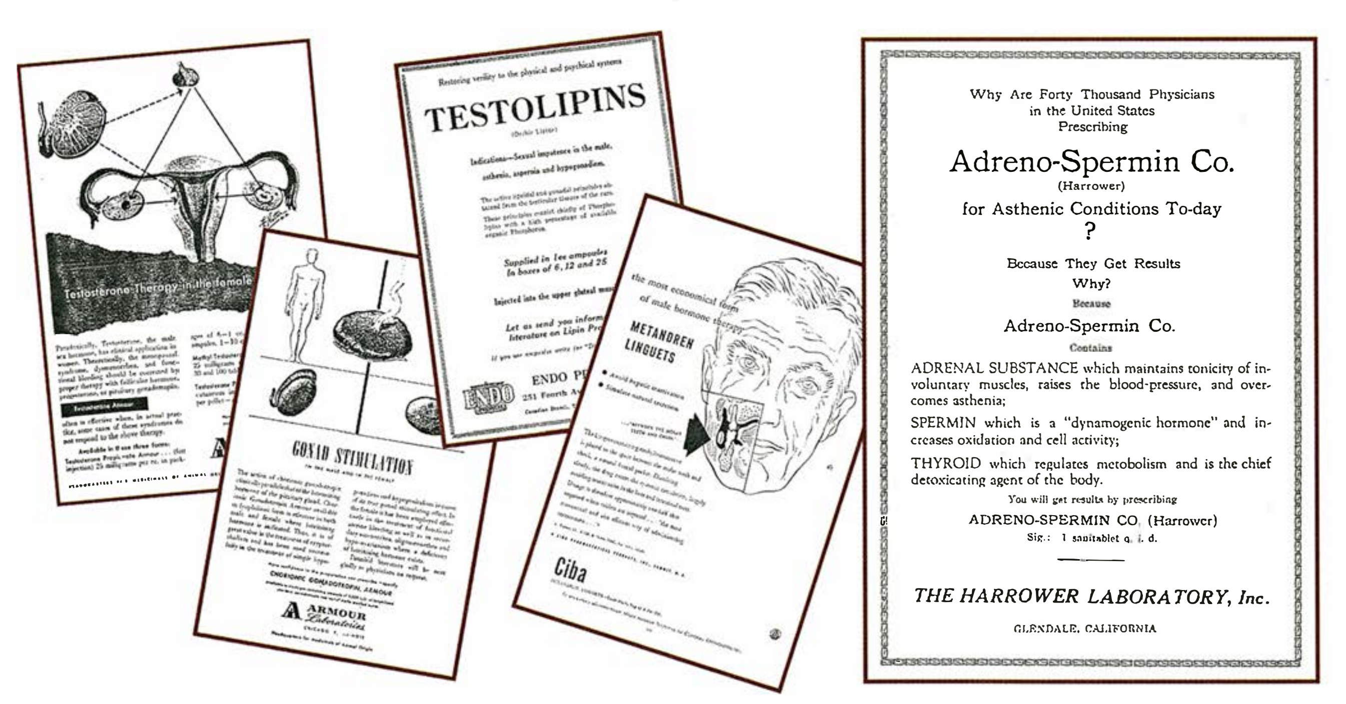
Había empezado la lucha por el mercado de la testosterona sintética. En 1937 ya estaban en marcha ensayos clínicos en humanos; se inyectaba propionato de testosterona, un derivado de liberación lenta de la testosterona, y administraban dosis orales de metil-testosterona, que se degrada en el organismo más despacio que la propia testosterona. En su comienzo, estos experimentos pecaban de la misma aleatoriedad y carencia de regulación que los métodos primitivos en los que se utilizaban extractos testiculares o trasplantes. En su fase inicial, sin embargo, la terapia de testosterona sintética se aplicó de manera principal a los varones con hipogonadismo, para promover su desarrollo completo o mantener los caracteres sexuales secundarios, y a quienes padecían un "climaterio masculino", mal definido, que abarcaba la impotencia.

Pero también se recetaron testosteronas sintéticas ante diversos trastornos de la mujer: menorragia, dolores mamarios, dismenorrea y cánceres de mama dependientes de estrógenos, so pretexto de que la testosterona neutralizaba los estrógenos. Desde hace casi un siglo, los médicos saben que la alteración del equilibrio hormonal en ciertas mujeres induce la regresión de sus tumores metastásicos de mama. Se acepta hoy que aproximadamente un tercio de las mujeres con cáncer de mama tienen tumores "hormonodependientes"; la androgenoterapia constituye un tratamiento de segunda o tercera opción para las mujeres posmenopáusicas con cáncer de mama avanzado. Por contra, en los años cuarenta, cuando todavía se ignoraba casi todo lo relativo al mecanismo de su efecto antitumoral, la terapia andrógena se indicaba para mujeres de diversas edades. Se descubrió entonces que los andrógenos podían aliviar el dolor, aumentar el apetito y el peso, amén de promover una sensación de bienestar, consiguieran o no detener el desarrollo del tumor.

A raíz de la terapia femenina de testosterona se comprobó que los andrógenos despertaban o intensificaban la libido en la mayoría de las pacientes. En 1939, se publicó que la aplicación diaria de una pomada de testosterona había aumentado el tamaño del clítoris de una mujer casada, quien ahora podía llegar al orgasmo. Más común resultaba el uso subfascial de píldoras e inyecciones para conseguir efectos similares, y raro era que las dosis masivas administradas a algunas pacientes con cáncer de mama no consiguieran intensificar su impulso sexual.

Con todo, no se generalizó el recurso a la testosterona para potenciar la respuesta sexual femenina. Temíanse sus efectos secundarios; entonces, como ahora, algunas pacientes experimentaban el renacer del apetito sexual como algo desazonador e inoportuno. Pero el obstáculo mayor contra esa generalización residía en la voluntad de los médicos de encontrar un anabolizante esteroideo que no virilizara a sus pacientes con una voz más profunda y ronca, vello en la cara y el cuerpo y un clítoris aumentado de tamaño. Aunque no todos los médicos se alarmaron por tales síntomas, las valoraciones que se hicieron de ellos, incluida la posibilidad de su carácter irreversible, despertaron acalorados debates.

La idea de que la testosterona contrarrestaba los efectos de los estrógenos estimuló su uso terapéutico entre homosexuales varones (uno de los objetivos de los trasplantes quirúrgicos de principios de los años veinte). "No cabe duda de que es mayor la concentración de estrógenos entre los homosexuales", escribía cierto equipo investigador en *Endocrinology* en 1940; y llegaba a la conclusión de que "el homosexual constitucional tiene diferente química hormonal sexual



3. ANUNCIOS sobre productos derivados de la hormona masculina. En el más antiguo de los que se muestran (*derecha*), aparecido en el *Journal of the National Medical Association* en 1924, se hace alarde de que "Adreno-Apermin Co." es "dinamogénica", término que Brown-Séquard asoció con los extractos testiculares animales que él preparó.

que el varón normal”. En 1944 otro grupo describió “una serie de ensayos clínicos de organoterapia” en la que participaron 11 “homosexuales declarados que solicitaron el tratamiento por razones diversas”. Cuatro de ellos habían “aceptado la organoterapia por coacción”: por orden del tribunal en un caso y de los padres en los otros tres.

Al no controlarse mediante un grupo placebo, la organoterapia fracasó. Más aún, cinco sujetos vieron redoblada su propia tendencia sexual; y así, acabó por concederse la probabilidad de que “la administración de andrógenos al homosexual activo (o agresivo) intensificaría su tendencia sexual” en vez de mermarla. Pero ni siquiera ante ese obstáculo se apagó el *furor therapeuticus* de los investigadores. “Los resultados, en los casos apropiados”, escribieron, “son demasiado buenos como para permitir que cunda un pesimismo indebido respecto al valor de este tratamiento.”

A lo largo de ese mismo decenio se descubrió que la testosterona favorecía el desarrollo del tejido muscular. Charles D. Kochakian, un adelantado de la investigación de la hormona sintética, publicó ya en 1935 que los andrógenos estimulaban el anabolismo de las proteínas, sugiriendo la posibilidad de que la terapia fundada en ellos restaurase el tejido proteico y promoviese su desarrollo en pacientes de determinado espectro de alteraciones. La bibliografía clínica de principios de los años cuarenta se ocupó con frecuencia de la correlación entre andrógenos y desarrollo muscular, jugando incluso con la posibilidad de que tales compuestos incrementasen el rendimiento deportivo. Hubo un grupo que, en 1941, decidió “investigar si la resistencia del varón para el trabajo muscular podría intensificarse con la testosterona” y obtuvo resultados positivos. En 1944 algún experto se preguntaba ya si “la pérdida de la capacidad laboral con la edad procedería de forma diferente si lograra mantenerse, por vía artificial, una mayor concentración de la hormona sexual”.

Paul de Kruif popularizó muchos de estos hallazgos en *The Male Hormone*, publicado en 1945. Este libro, muy leído, contribuyó sin duda a promover el uso de la testosterona entre los deportistas. A finales de ese decenio y comienzos del siguiente, los culturistas de la norteamericana costa del Pacífico comenzaron a tomar preparaciones de testosterona. Las noticias de la eficacia de estos fármacos se propagaron, a comienzos de los sesenta, a otros deportes que requieren el uso intensivo de fuerza, desde las pruebas de lanzamiento de campo y de pista hasta el rugby.

Durante los últimos 30 años el consumo de esteroides anabolizantes se extendió a otros deportes olímpicos: hockey, natación, ciclismo, esquí, balonvolea, lucha libre, balonmano, trineo de carreras y fútbol. Aunque su empleo está generalizado en los equipos universitarios, muchos deportistas los toman sólo para desarrollar músculos, sin fines competitivos. Los programas de antidopaje, dirigidos a eliminar de los deportes el recurso a los esteroides, han perdido bastante eficacia desde su establecimiento en los años setenta. Las técnicas de control suelen carecer de la sensibilidad necesaria para descubrir el consumo; muchos deportistas de elite y preparadores sin escrúpulos dominan las trampas para sortear la detección.

Algunos de los usos clínicos de la testosterona sintética se remontan a los orígenes de la androgenoterapia. De las aplicaciones de los esteroides anabolizantes, la más frecuente y aceptada ha sido el tratamiento de sustitución para los varones con hipogonadismo. Se han administrado también para tratar la impotencia en pacientes con niveles séricos de testosterona normales o por debajo de lo normal. Los ésteres de testosterona se emplean para estimular el crecimiento e iniciar la pubertad en niños con problemas de desarrollo. Desde los años cuarenta se ha venido recurriendo a los andrógenos para las afecciones de emaciación asociadas con enfermedades debilitantes crónicas (como las sufridas por las víctimas de los campos de concentración nazis) y con traumatismos (por ejemplo, las lesiones de guerra), quemaduras, cirugía y radioterapia.

Sabido es que los esteroides anabolizantes incrementan la producción de eritrocitos (eritropoyesis). Por eso mismo constituyeron la terapia primaria en diversas anemias antes de generalizarse los trasplantes de médula ósea y los tratamientos con eritropoyetina sintética. Desde finales de los años treinta hasta mediados los ochenta, los psiquiatras prescribieron esteroides anabolizantes para curar la depresión, la melancolía y la psicosis involutiva. Los ésteres de testosterona se usan hoy como coadyuvantes en el tratamiento con hormona del crecimiento humana (HCH) de niños deficitarios en la misma. Se ha empezado a ensayar la aplicación de esteroides anabolizantes para hacer frente a la debilidad y la emaciación muscular que comporta la progresión de la infección por el VIH y el sida. Los estudios de casos clínicos son prometedores e indican que estos pacientes experimentan una mejor sensación de bienestar y un aumento del vigor, la masa magra y el apetito.

En otro terreno, desde las postrimerías de los setenta se viene trabajando en ésteres de testosterona para convertirlos en un posible método de regulación de la fertilidad masculina a través de un bucle de retroalimentación endocrina. El hipotálamo reac-

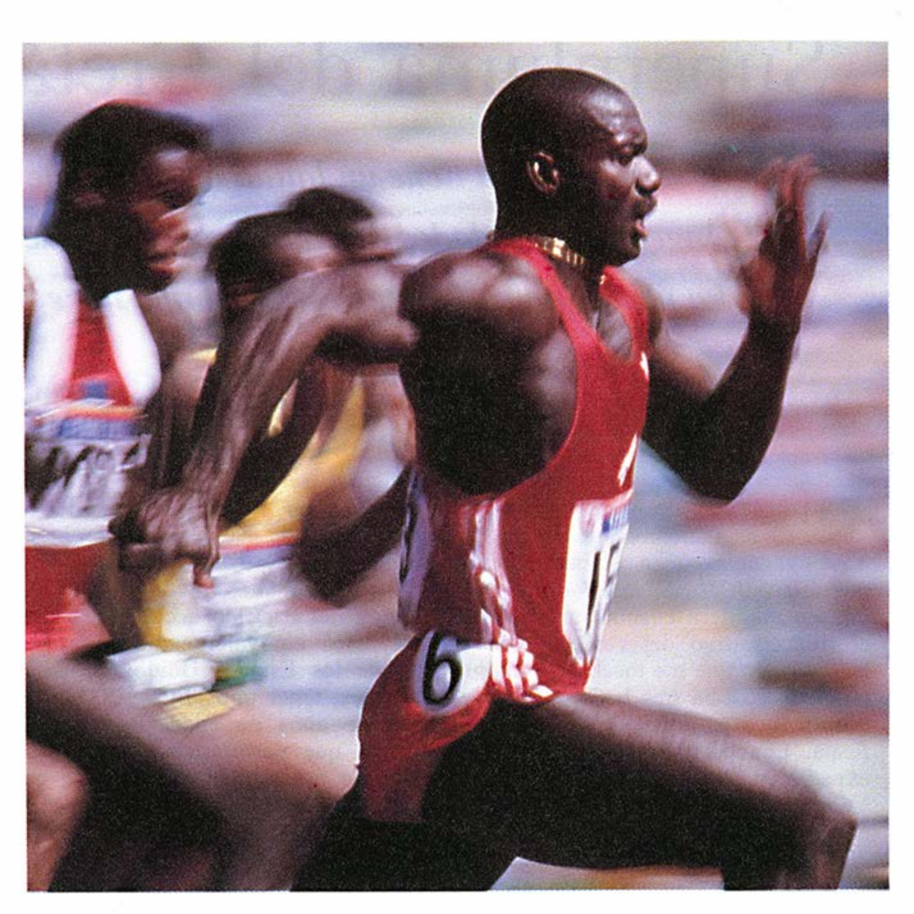
Esteroides androgénicos anabolizantes

Los esteroides androgénicos anabolizantes son todos derivados sintéticos de la testosterona (*estructura molecular inferior*), la hormona masculina natural producida fundamentalmente por los testículos. Las mujeres también sintetizan testosterona, aunque en menor cuantía que los varones. La hormona es responsable de los efectos androgénicos, o masculinizantes, y anabolizantes, o formadores de tejidos, observados durante la adolescencia y la madurez masculina. Los principales efectos androgénicos en los varones consisten en el desarrollo del sistema reproductor y de los caracteres sexuales secundarios. En el púber se manifiestan por aumentos de la longitud y el diámetro del pene, el desarrollo de la próstata y el escroto y la aparición del vello púbico, axilar y facial.

Los efectos anabolizantes son los que tienen lugar en el tejido somático y no reproductor. Consisten en el engrosamiento de las cuerdas vocales, la aceleración del crecimiento lineal que aparece antes del cierre de las epífisis óseas, el aumento de tamaño de la laringe y el desarrollo de la libido y la potencia sexual. Se produce también un aumento de la masa muscular y la fuerza, así como una disminución de la grasa corporal.

ciona ante niveles elevados de testosterona en sangre reduciendo la liberación de otra hormona, la hormona liberadora de la hormona luteinizante, que, vía hipofisaria, afecta no sólo a la producción de testosterona, sino también de esperma. En 1990 la Organización Mundial de la Salud publicó los resultados de un ensayo global realizado en 10 centros en los que se establecía la eficacia de los esteroides anabolizantes como anticonceptivo masculino con mínimos efectos colaterales físicos a corto plazo. Es interesante observar que las dosis prescritas para estos sujetos eran mayores que la tomada por el proscrito velocista olímpico Ben Johnson. La legalización de los esteroides anabolizantes como anticonceptivos masculinos debilitaría la argumentación médica contraria a su empleo en el deporte.

A finales del decenio de los ochenta, tornó a abordarse el efecto ejercido por la testosterona sobre el envejecimiento "saludable". Respondía ese giro, en parte, al envejecimiento de la sociedad y a los favorables resultados provisionales de la suplementación con HCH en varones ancianos. Ya en nuestra década, varios científicos dirigieron estudios piloto sobre los efectos de la administración de testosterona a varones mayores de 54 años con niveles de ésta bajos o normales. Los resultados, en general positivos, consistieron en una ganancia de masa corporal magra y de fuerza, una posible disminución de la resorción ósea (con el potencial de invertir o mejorar la fragilidad), un aumento del deseo y la actividad sexuales y una mejora de la cognición espacial y la memoria verbal.



4. BEN JOHNSON fue despojado de la medalla de oro conseguida en los Juegos Olímpicos de Seúl, de 1988, después de que las pruebas antidopaje revelaran que había tomado esteroides anabolizantes para potenciar su rendimiento.

Si la mayoría de los médicos aceptan la eficacia de la terapéutica de sustitución hormonal en las mujeres, no ha lugar a dudar de que adoptarán una terapia hormonal comparable para los varones. El Centro Sanitario Hormonal de Londres administra inyecciones de testosterona a cientos de hombres con independencia de su edad, y un ginecólogo del Hospital Westminster londinense prescribe píldoras de testosterona a aproximadamente el 25 por ciento de sus pacientes posmenopáusicas. Es probable que esta tendencia continúe, lo que significa que el tratamiento con testosterona podría convertirse en una práctica médica generalizada de aquí a diez años.

Basamos nuestra previsión en la demanda popular y en estrategias comerciales, que pueden contribuir a definir nuevas "alteraciones" médicas. En 1992, el Instituto Nacional de la Salud norteamericano solicitó proyectos de investigación para determinar si la terapia de testosterona puede evitar los achaques físicos y la depresión en los varones ancianos, planteando con ello la cuestión de si el proceso de envejecimiento debe reconocerse oficialmente como una patología de deficiencia, susceptible de ser tratada. Debemos a John B. McKinlay, especialista en envejecimiento, el siguiente pronóstico: "No creo en la crisis masculina de la madurez. Pero, aun cuando no hay datos epidemiológicos, fisiológicos ni clínicos de ese síndrome, estoy convencido de que en el año 2000 el síndrome existirá. Se percibe un enorme interés lucrativo por tratar a los varones durante el período de envejecimiento, igual que existe en el caso de las mujeres menopáusicas."

El interés comercial despertado por la demanda pública de andrógenos podría hacer que los médicos pasaran por alto efectos colaterales deletéreos y sobrevaloraran su utilidad clínica. A este respecto, en el número de enero de 1994 del *Journal of Urology*, el equipo de McKinlay afirmaba que no había correlación entre la testosterona, en cualquiera de sus formas, y la impotencia, una "importante preocupación sanitaria" que afecta a un mercado potencial de 18 millones de hombres para quienes la testosterona se ha venido prescribiendo hace tiempo en una escala mucho menor. Pero es improbable que la incapacidad para confirmar la eficacia de la testosterona ante determinada alteración detenga su uso para reforzar los cuerpos que envejecen o restablecer un apetito sexual menguante. La verdad es que existe una tendencia creciente a considerar el envejecimiento un problema médico, lo que conduce a reconocer la realidad de una "menopausia masculina", objeto de terapia igual que su homóloga femenina.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ANABOLIC-ANDROGENIC STEROIDS. Charles D. Kochakian. Springer-Verlag, 1976.

THE MONKEY GLAND AFFAIR. David Hamilton. Chatto and Windus, 1986.

MORTAL ENGINES: THE SCIENCE OF PERFORMANCE AND THE DEHUMANIZATION OF SPORT. John Hoberman. Free Press, 1992.

ANABOLIC STEROIDS IN SPORT AND EXERCISE. Editado por Charles E. Yesalis. Human Kinetics Publishers, Champaign, Ill., 1993.

Superpluma del Cretácico medio

La Tierra tiene un latido errático que puede liberar ingentes cantidades de calor procedente de sus profundidades. La última pulsación terrestre ocurrió hace 120 millones de años

Roger L. Larson

Sería la una de la madrugada del 13 de diciembre de 1989. Navegábamos en el buque oceanográfico *JOIDES Resolution*. Dormía en mi litera cuando me despertó el ruido festivo del camarote de al lado. Puesto que me tocaba el próximo turno de guardia tres horas más tarde, decidí incorporarme y unirme a la fiesta. Los paleontólogos de nuestra expedición acababan de notificar a Yves Lancelot, hoy en la Universidad de Aix-Marseilles y entonces codirector de la campaña, el hallazgo de microfósiles jurásicos en el sondeo del Pacífico occidental que habíamos estado perforando a más de tres millas bajo nuestros pies. Dos días después alcanzamos el zócalo volcánico —corteza oceánica del Jurásico medio, de unos 165 millones de años de antigüedad. Se acababa de resolver un enigma de 20 años. Por fin contábamos con una prueba de peso de los sedimentos oceánicos y las rocas volcánicas más antiguos que han permanecido durante millones de años en el lugar donde se formaron.

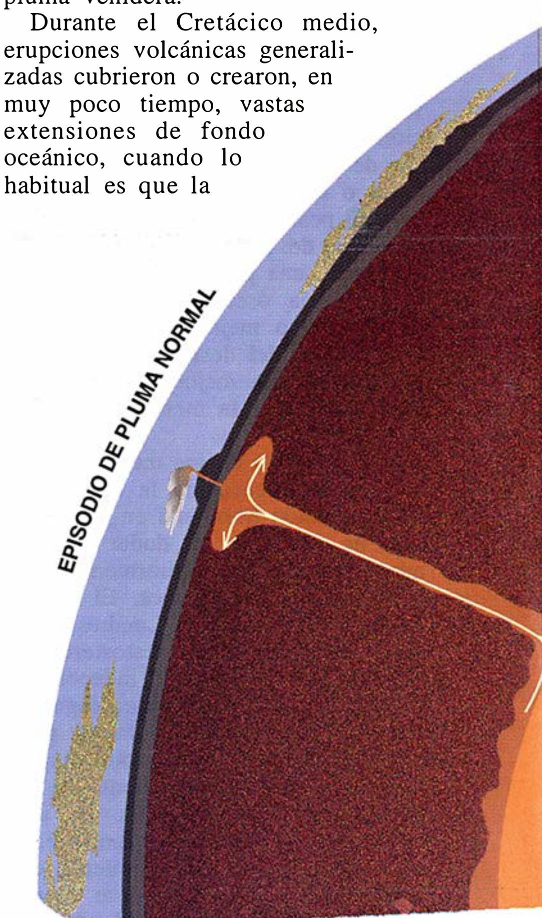
Pasé días pensando por qué la respuesta había tardado tanto. Mis colegas Clement G. Chase, de la Universidad de Arizona, Walter C. Pitman III, del Observatorio Geológico Lamont-Doherty, Thomas W. C. Hilde, de la Universidad A & M de Texas, y yo nos habíamos planteado ya la cuestión en los comienzos de los años setenta. No era un problema irrelevante. Apoyados en datos geofísicos, habíamos predicho que una región del Pacífico occidental de una extensión equivalente a la continental de los Estados Unidos debía ser jurásica, tener unos 145 a 200 millones de años de edad. Pero dondequiera que perforábamos o dragábamos de esa región, recogíamos, casi invariablemente, basaltos, esto es, rocas formadas por erupciones volcánicas durante el Cretácico medio, de edad comprendida por lo general entre 80 y 120 millones de años, nunca anteriores. La primera muestra de basalto la extrajo de las montañas del Pacífico central, en 1950, una de las primeras expediciones de la Institución Scripps de Oceanografía. Sin embargo, hasta el descubrimiento del *JOIDES Resolution* los geológos apenas se habían asomado al origen del basalto mesocretácico, aparentemente omnipresente, ni a la posible existencia de material jurásico subyacente.

El descubrimiento de 1989 aportó respuestas cualitativas. A mediados del Cretácico, una "superpluma" de material volcánico sepultó los sedimentos y corteza oceánica más antiguos. Por fin, nuestras intuiciones de principios de los setenta podían fundamentarse en observaciones reales: había jurásico en el Pacífico occidental. Teníamos muestras bajo llave a bordo del *JOIDES Resolution*.

Por mi formación de geofísico busco siempre la descripción cuantitativa de la Tierra y sus procesos. Quería determinar el tamaño de la superpluma mesocretácica del Pacífico occidental, con la esperanza de conocer algo sobre sus orígenes. Pero del dicho al hecho hay un buen trecho. ¿Qué medir y cómo medirlo? Sin saber siquiera cómo era un episodio "normal", ¿cómo describir el "anómalo" de la superpluma mesocretácica? Había que ampliar el marco temporal y espacial más allá del Pacífico occidental mesocretácico. Decidí investigar la tasa de formación de corteza oceánica —principalmente rocas volcánicas como los basaltos que constituyen el zócalo subyacente bajo el suelo marino— de todos los océanos en el transcurso de su historia. Así, la anomalía mesocretácica, fuera lo que fuese, destacaría del fondo. Tal vez también aparecieran indicios de la cronología de la superpluma venidera.

Durante el Cretácico medio, erupciones volcánicas generalizadas cubrieron o crearon, en muy poco tiempo, vastas extensiones de fondo oceánico, cuando lo habitual es que la

ROGER L. LARSON comenzó a familiarizarse con los océanos recién terminada su licenciatura en geología en la Universidad estatal de Iowa. En 1970 se doctoraba en ciencias del mar por la Institución Scripps de Oceanografía, en San Diego. Tras su paso por el Observatorio Geológico Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia, entró en el claustro docente de la Universidad de Rhode Island. Ha desempeñado funciones directivas en 13 expediciones oceanográficas al Pacífico occidental.



1. LAS SUPERPLUMAS crean vastas extensiones de mesetas y montes submarinos (*derecha*), en claro contraste con la exigua región afectada por plumas normales (*izquierda*). Las plumas se represen-

expansión del fondo marino genere, a un ritmo lento y regular, la mayor parte de la corteza oceánica. En el proceso arquetípico, la corteza envejece simétricamente a ambos lados de las dorsales mesoceánicas con el aumento de la distancia al centro, donde asciende magma del manto terrestre que se enfría y solidifica. A medida que va ascendiendo magma nuevo, la corteza oceánica ya formada va quedando más y más desplazada, desde el centro de erupción hacia los flancos de la dorsal. Por tanto, cualquier parcela particular de corteza es transportada como si se hallara sobre una de dos cintas transportadoras idénticas que se mueven en sentidos opuestos desde la dorsal mesoceánica (*véase* "La dorsal centro-oceánica", de Kenneth C. Macdonald y Paul J. Fox, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1990).

Grandes extensiones del fondo oceánico formado por expansión —llamadas llanuras abisales— están accidentadas por secuencias organizadas de colinas abisales y por zonas de fractura transversales a las dorsales mesoceánicas. Pero el Pacífico occidental no es así. Su fisiografía semeja una carretera fangosa o pista embarrada por las lluvias de primavera. A través de las cadenas de montes submarinos, sin orden aparente y más altas que las colinas abisales, y de las mesetas oceánicas que constituyen la "pista embarrada" del Pacífico occidental no se detectan gradientes de edad sistemáticos. La única característica que comparten es su edad mesocretácica en los casos datados.

Comencé por medir la tasa irregular de producción de corteza oceánica. Para ello recabé información sobre áreas y edades del fondo oceánico y calculé el grosor de la corteza. Logré calcular dicha tasa para los últimos 150 millones de años, remontándome hasta casi la edad máxima de las cuencas oceánicas de todo el mundo. Tales cálculos de producción cortical planetaria revelan con claridad la superpluma cretácica (*véase la figura 3*).

El histograma mundial muestra el comienzo súbito de la pluma hace de 120 a 125 millones de años, cuando en un lapso de cinco millones de años se duplicó la producción de corteza oceánica. La producción cortical alcanzó su valor máximo tras el inicio de la pulsación, y luego fue remitiendo más o menos linealmente a lo largo de 70 a 80 millones de años. Retornó a los valores anteriores al episodio hace de 30 a 40 millones de años. En la producción cortical oceánica la superpluma mesocretácica se pone de manifiesto a escala planetaria. Pero la mera existencia de la pulsación no revela su causa.

Pensé que la clave del enigma radicaría en el desarrollo de mesetas oceánicas y cadenas de montes submarinos. En el Cretácico

tan en una secuencia progresiva de acontecimientos que son propios de plumas y superplumas: nacimiento en la capa de límite térmico, ascenso a través del manto, aplanamiento bajo la litosfera y erupción en la superficie. La geografía real correspondiente al acontecimiento de la superpluma mesocretácica en el Pacífico mostraría las plumas en un orden más irregular.



2. LA "CARRETERA DE BARRO" del fondo del Pacífico occidental se debe a la intensa actividad volcánica ocurrida durante el acontecimiento de la superpluma mesocretácica, que produjo mesetas y cadenas de montes submarinos dispuestos sin orientación preferente alguna. Por el contrario, el fondo del Pacífico oriental presenta la fisiografía lisa y alineada propia de corteza formada por expansión del fondo marino. (Según *World Ocean Floor Map*, de Bruce C. Heezen y Marie Tharp, 1977.)

medio, la tasa de producción de esas formaciones aumentó a la par que la tasa de producción general, con un comienzo impulsivo similar y un prolongado retorno a valores normales. Si bien la amplitud máxima de la altura de tal pulsación fue menor que la correspondiente a la curva del total mundial, el incremento relativo fue mucho mayor: el quíntuple para mesetas y montes submarinos frente al doble para el total. Por tanto, lo que produjo el episodio de superpluma también causó su máximo efecto en la generación de mesetas y cadenas de montes.

¿Qué genera esas mesetas y cadenas de montañas submarinas? Desde supuestos distintos, diversos investigadores han coincidido en la idea de que esos accidentes se deben a plumas de un material procedente de gran profundidad en el manto terrestre que se ha sobrecalentado y ascendido por flotación en virtud de su menor densidad (*véase* "Grandes provincias ígneas," de Millard F. Coffin y Olav Eldholm en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1993). En particular, las mesetas oceánicas resultan de erupciones rápidas iniciales, que arrastran gran cantidad de material y están provocadas por esas plumas ascendentes. Tales ascensos a veces ocurren en los continentes, donde se pueden estudiar directamente. Los Basaltos de Paraná en Brasil o las Mesetas Basálticas del Deccán en la India occidental y de Siberia en Rusia septentrional consisten en vastos campos de coladas basálticas, de varios centenares de kilómetros de extensión y uno o dos de grosor (*véase* "Vulcanismo en los rifts," de Robert S. White y Dan P. McKenzie, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1989). Las mesetas oceánicas son accidentes parecidos a sus parientes continentales, aunque mayores. Por ejemplo, se calcula que la mayor oceánica (la meseta de Ontong-Java del Pacífico occidental) es 25 veces más voluminosa que la mayor continental (la del Deccán).

Las cadenas de montes submarinos arrancan de mesetas oceánicas y resultan del material que se encontraba por detrás y por debajo del material delantero de la pluma ascendente. Como las plumas son bastante fijas y las placas tectónicas suprayacentes se desplazan horizontalmente por la superficie del planeta, las erupciones subsiguientes que van generando cada monte de la cordillera nos ofrecen un registro de los movimientos de las placas. Por tanto, esas cadenas submarinas deberían tener una antigüedad mayor en la vecindad de la meseta oceánica madre y dibujar un rosario de montes cada vez más recientes que terminaría en un volcán activo, siempre que la "chimenea" que llega hasta el manto profundo siga funcionando. La más célebre de esas alineaciones montañosas es la de las islas Hawai, que se prolonga sumergida hacia el noroeste del archipiélago. Su sistema de pluma ascendente se halla hoy bajo la isla de Hawai, donde se mantienen las erupciones volcánicas. La antigüedad de islas y montes submarinos crece conforme miramos hacia el noroeste. ¿Por qué? Porque han avanzado transportados por la placa pacífica: en su desplazamiento hacia el noroeste, puntos sucesivos de la misma van pasando sobre un emplazamiento fijo de pluma.

En cuanto advertí que los accidentes corticales oceánicos más afectados por la actividad volcánica mesocretácica —cadenas y mesetas submarinas— se habían formado por plumas de material del manto, supuse, por obvia inferencia lógica, que la anomalía entera debíase a una pluma que operaba a una escala mucho mayor que la normal. Y así introduje el neologismo: tratábase de un "episodio de superpluma". La pulsación inicial de la superpluma llegó a la superficie terrestre hace unos 120 millones de años; la intensa actividad volcánica, que empezó de repente, prosiguió durante el Cretácico medio, unas decenas de millones de años, para ir luego remitiendo poco a poco.

Lo más problable es que el episodio de la superpluma lo provocara el ascenso de una o tal vez de varias plumas enormes que subieron a través de un manto fácilmente deformable, se expandieron por la base de la litosfera, la cáscara externa más rígida de la Tierra, y se derramaron sobre el fondo oceánico. El Pacífico

fue el océano más afectado, pero hay también pruebas de ese episodio en el Indico, el Atlántico y el Caribe. La superficie de Pacífico involucrada mide varios miles de kilómetros de diámetro, valor que contrasta llamativamente con el tamaño de las regiones hoy afectadas por actividad de pluma, que ocupan sólo una décima parte de aquélla.

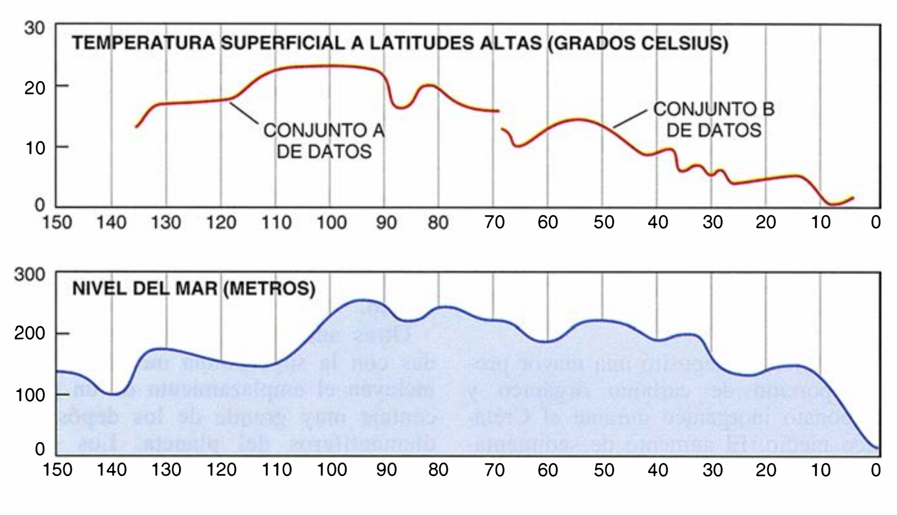
Sospecho que las plumas sobrecalentadas ascienden desde la propia base del manto y afectan al proceso que genera inversiones del campo magnético terrestre en el núcleo externo subyacente. Hay una correlación inversa general entre la tasa de producción de corteza formada por plumas y la frecuencia de inversiones del campo magnético terrestre. Por ejemplo, durante períodos de intensa actividad de pluma, incluido el Cretácico medio, apenas se registraron inversiones magnéticas. Por contra, si la actividad de pluma es baja, lo que ocurre hoy en día, las inversiones se producen a un ritmo récord. Sigue siendo un misterio el modo en que se invierte la polaridad del campo magnético. Peter L. Olson, de la Universidad Johns Hopkins, y el autor opinan que la correlación entre formación de corteza e inversión de campo magnético puede proporcionar una clave para entender el mecanismo de las inversiones y determinar la fuente del material de pluma de manto. En nuestra opinión, el aumento en la "tasa de ebullición" del núcleo provoca una menor frecuencia de inversiones magnéticas. Además, la conexión puede revelar información relativa al advenimiento de la próxima superpluma.

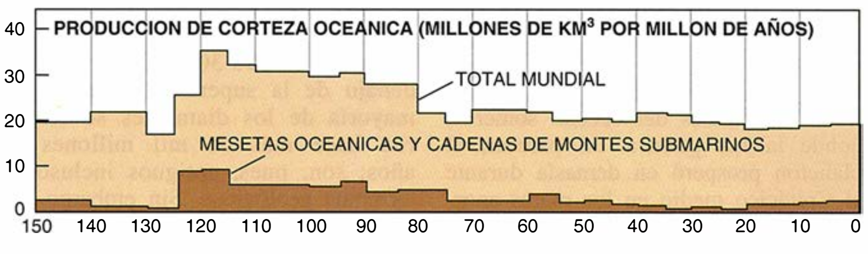
A buen seguro, el hierro hirviente del núcleo externo constituye la fuente del campo magnético terrestre. Este hierro fundido es un excelente conductor eléctrico; el movimiento convectivo del hierro y su campo eléctrico asociado genera el campo magnético terrestre. El calor cedido por el hierro fundido atraviesa el límite núcleo-manto, tapa de ese puchero hirviente, mediante un mecanismo de conducción. El calor queda atrapado encima mismo del límite, en los 100 o 200 kilómetros inferiores de roca sólida de silicatos del manto. Este proceso prosigue hasta que se almacena un exceso de calor. Entonces, la fuerza ascensional del manto inferior, sobrecalentado y poco denso, supera la viscosidad de la roca más fría y densa del manto suprayacente. Vastas plumas de material del manto ascienden casi 3000 kilómetros a través del manto y terminan por desencadenar erupciones volcánicas en la superficie. El material ascendente extrae calor del manto inferior, lo que permite al núcleo externo hervir con renovado vigor.

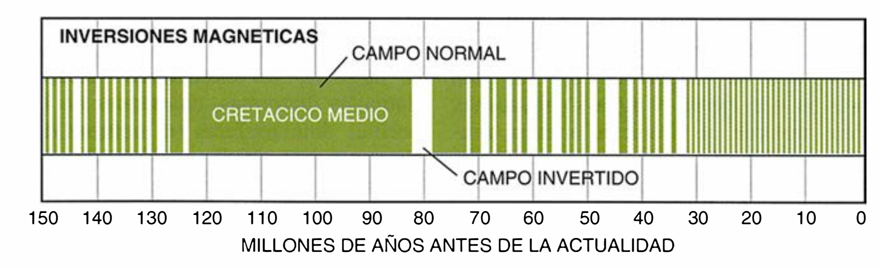
El más reciente de estos grandes circuitos hizo erupción hace 120-125 millones de años. Constituyó el episodio de la superpluma mesocretácica. Gran parte del material que entonces alcanzó la superficie dejó la "pista embarrada" que hoy se aprecia en el fondo del Pacífico occidental. Un episodio así, que en un período breve dobló la tasa total de producción cortical oceánica, debió conllevar consecuencias geológicas. El Cretácico medio se caracterizó por varias anomalías profundas resultantes de la superpluma.

La primera, y probablemente la menos controvertida, es el ascenso mundial del nivel del mar unos 250 metros o más por encima del actual. Suponiendo constante la cantidad total de agua marina en los océanos del planeta, una subida del nivel del mar refleja un ascenso correspondiente de nivel del fondo marino. Sobre una corteza recién formada, la profundidad del océano es anormalmente somera, porque la corteza y toda la litosfera subyacente se hallan todavía relativamente calientes, son menos densas y están dilatadas. Al enfriarse, se contraen; y ello determina un aumento de profundidad del fondo marino.

Este fenómeno de dilatación y contracción explica por qué las crestas de las dorsales oceánicas, donde se genera corteza nueva, se encuentran más altas que los flancos, constituidos por corteza más antigua y profunda. Si un volumen anormal, por enorme, de corteza nueva se forma



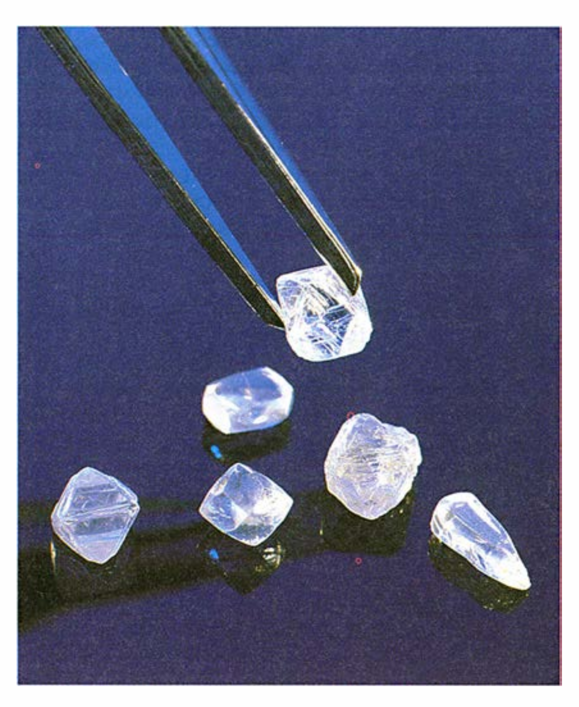




3. ENTRE LAS CONSECUENCIAS GEOLOGICAS de la superpluma mesocretácica hemos de numerar el aumento de la temperatura superficial y la subida del nivel del mar. La propia superpluma se manifiesta en el incremento de la tasa total mundial de producción de corteza oceánica; se refleja, sobre todo, en la tasa de formación de mesetas oceánicas y cadenas de montes submarinos. Además, las inversiones del campo magnético terrestre cesaron durante la superpluma. Hoy las inversiones ocurren con frecuencia, lo que indica que la actividad de pluma es baja.

de repente —lo que aconteció en el inicio del episodio mesocretácico—, se elevará el nivel medio del fondo del mar y subirá también el nivel superficial del agua marina. A mediados del Cretácico, los niveles que alcanzó el mar en ascenso inundaron buena parte de lo que hoy es tierra emergida. Cuando el agua retrocedió, dejó depósito de caliza y creta, incluidos los famosos acantilados White Cliffs de Dover, en Inglaterra.

El episodio de la superpluma elevó, asimismo, la temperatura superficial del planeta. Toda erupción libera determinadas sustancias, incluido dióxido de carbono. Los incrementos de dióxido de carbono en la atmósfera mesocretácica condujeron a un efecto invernadero natural que aumentó las temperaturas del planeta unos 10 grados Celsius. El estudio de los efectos de los altos niveles de dióxido de carbono durante aquel período permitiría vislumbrar posibles escenarios futuros del clima de la Tierra. La quema masiva de combustibles fósiles y la deforestación a gran escala siguen incrementando el nivel de dióxido de carbono en la atmósfera moderna.



4. LOS DIAMANTES que se extraen de la kimberlita, como estos de Africa occidental, arribaron a la superficie terrestre durante el episodio de la superpluma mesocretácica.

También se depositó una mayor proporción de carbono orgánico y carbonato inorgánico durante el Cretácico medio. El aumento de sedimentación se relaciona con las elevaciones del nivel del mar y de la temperatura del aire, resultantes, como hemos visto, del episodio de la superpluma. Los minúsculos animales y plantas que integran el fitoplancton y el zooplancton flotan en niveles del océano someros, donde la luz penetra. Al parecer, el plancton prosperó en demasía durante el Cretácico medio en los mares anormalmente cálidos que acompañaron el calentamiento natural de la atmósfera. Cuando esos organismos mueren, sus restos suelen caer al fondo marino y enseguida se disuelven bajo la gran presión que ejerce el agua suprayacente. Pero durante el Cretácico medio, muchos lugares de decantación eran continentes inundados. En las aguas someras el carbonato de los esqueletos no se disolvió, sino que sedimentó; parte de él formó los acantilados de Dover. En cuanto a los restos de carbono orgánico, los que quedaron enterrados a mayor profundidad llegaron a convertirse en petróleo. El petróleo resultante constituye más del 50 por ciento de las reservas mundiales. No deja de resultar paradójico que el fruto de ese efecto invernadero mesocretácico pueda devenir el combustible que provoque el próximo episodio invernadero.

Otras anomalías geológicas asociadas con la superpluma mesocretácica incluyen el emplazamiento de un porcentaje muy grande de los depósitos diamantíferos del planeta. Los diamantes son carbono puro; sus átomos se han enlazado según la más densa y fuerte de las mallas de empaquetamiento bajo las fuertes presiones reinantes a 200-300 kilómetros por debajo de la superficie terrestre. La mayoría de los diamantes se formaron hace más de mil millones de años; son, pues, antiguos incluso en términos geológicos. Sin embargo, según Stephen E. Haggerty, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, muchos de ellos ascendieron a la superficie durante el Cretácico medio a lo largo de las estructuras volcánicas llamadas diatremas, chimeneas de kimberlitas diamantíferas (el nombre de la roca procede de la región minera de Kimberley, Sudáfrica), que se extienden corteza abajo hasta gran profundidad, y posiblemente penetran en el manto superior. Es probable que plumas ascendentes despegaran los diamantes de sus fuentes en el manto y los subieran sueltos en su estado sólido original.

El episodio de la superpluma determinó en buena medida la formación de la mayoría de las cordilleras de las costas occidentales de América del Norte y del Sur. Las montañas de Sierra Nevada en el oeste de Norteamérica y de los Andes en el oeste de Sudamérica se crearon durante el Cretácico medio por una subducción incrementada de corteza pacífica bajo dichos subcontinentes. La subducción junto a un continente ocurre cuando éste cabalga sobre una litosfera oceánica que se recicla en el manto subyacente. Recordemos que, debido a la proximidad de las plumas eruptivas, aumentaron espectacularmente las tasas de expansión del fondo del Pacífico.

Si el diámetro terrestre se ha de mantener constante, lo que sube tiene que bajar, de modo que si creció la tasa de producción de fondo oceánico, tuvo que hacerlo la de subducción. Por consiguiente, debieron subducir, bajo las costas occidentales americanas, volúmenes ingentes de corteza oceánica. A medida que la corteza y sus sedimentos oceánicos se fueron hundiendo y alcanzaron varios centenares de kilómetros bajo la superficie terrestre, con el aumento de la temperatura y la presión los minerales de punto de fusión más bajo se volvieron semilíquidos. Parte de la corteza continental adyacente también se fundió por calentamiento debido a fricción. Esta combinación de rocas fundidas regresó a las inmediaciones de la superficie conforme se relajaba su densidad y luego solidificó para formar los núcleos de granito de las cordilleras que son la columna vertebral de la costa occidental de las Américas.

Una fracción extensa de la historia geológica de la Tierra está controlada por acontecimientos cuyo verdadero origen radica a grandes profundidades del planeta, a unos 3000 kilómetros bajo nuestros pies. La historia aquí presentada alude sólo a algunos de los numerosos procesos dinámicos e interacciones provocados por el ascenso de material, desde el límite entre manto y núcleo, en pulsaciones esporádicas, así como a sus efectos en el ambiente superficial. La más reciente de estas emanaciones alteró espectacularmente el clima planetario, la estructura superficial y las reservas de minerales y de combustibles fósiles.

Apenas si hemos abordado la posibilidad de datos relativos a episo-

dios de superpluma anteriores, y ya comienza a controvertirse la tasa de "latido" del pasado de la Tierra. Es evidente que nuestro planeta se ha repuesto de los efectos del evento más reciente de superpluma, pero respecto a la fecha del próximo episodio no hay más que nuevas especulaciones.

Durante los últimos 40 millones de años la creación de mesetas oceánicas y cadenas de montes submarinos ha proseguido a un ritmo mucho más pausado. El nivel del mar ha bajado casi al máximo. Dado que hoy vivimos en una pausa en medio de una glaciación, la temperatura planetaria actual se acerca más al modelo de "iglú", que al de un invernadero. Según cabe esperar para períodos de poca actividad de pluma, el campo magnético terrestre está invirtiéndose con mayor frecuencia que nunca, y existe una gran anomalía térmica en la base del manto, lo que indica una tasa lenta de ebullición en el núcleo subyacente. Cálculos de rutina indican que la temperatura aumenta entre 1000 y 15.000 grados C a través de los 100 a 200 kilómetros inferiores del manto.

Han transcurrido 120 millones de años desde el último acontecimiento de superpluma y el advenimiento del próximo es sólo cuestión de tiempo. Todavía no podemos predecir cuándo acontecerá. En cuanto científicos, nos encontramos en una situación algo parecida a la de un campesino que trata de predecir la llegada de la primavera cuando la marmota se despereza de su aletargamiento. Sólo podemos decir que el próximo episodio de superpluma "está a la vuelta de la esquina".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE MID-CRETACEOUS SUPERPLUME, CARBON DIOXIDE, AND GLOBAL WARMING. Ken Caldeira y Michael R. Rampino en *Geophysical Research Letters*, vol 18, n.º 6, págs. 987-990, junio de 1991.

A SUPERPLUME IN THE MANTLE. K. G. Cox en *Nature*, vol. 352, n.º 6336, páginas 564-565, 15 de agosto de 1991.

SUPERPLUMES AND SUPERCHRONS. Mike Fuller y Robin Weeks en *Nature*, vol. 356, n.º 6364, págs. 16-17, 5 de marzo de 1992.

THE MESOZOIC PACIFIC: GEOLOGY, TECTONICS, AND VOLCANISM. Dirigido por Malcolm S. Pringle, William W. Sager, William V. Sliter y Seth Stein. American Geophysical Union, 1993.

SUPERKIMBERLITES: A GEODYNAMIC DIAMOND WINDOW TO THE EARTH'S CORE. Stephen E. Haggerty en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 122, n.º 1-2, páginas 57-69, marzo de 1994.

Hacia el "cero coma uno"

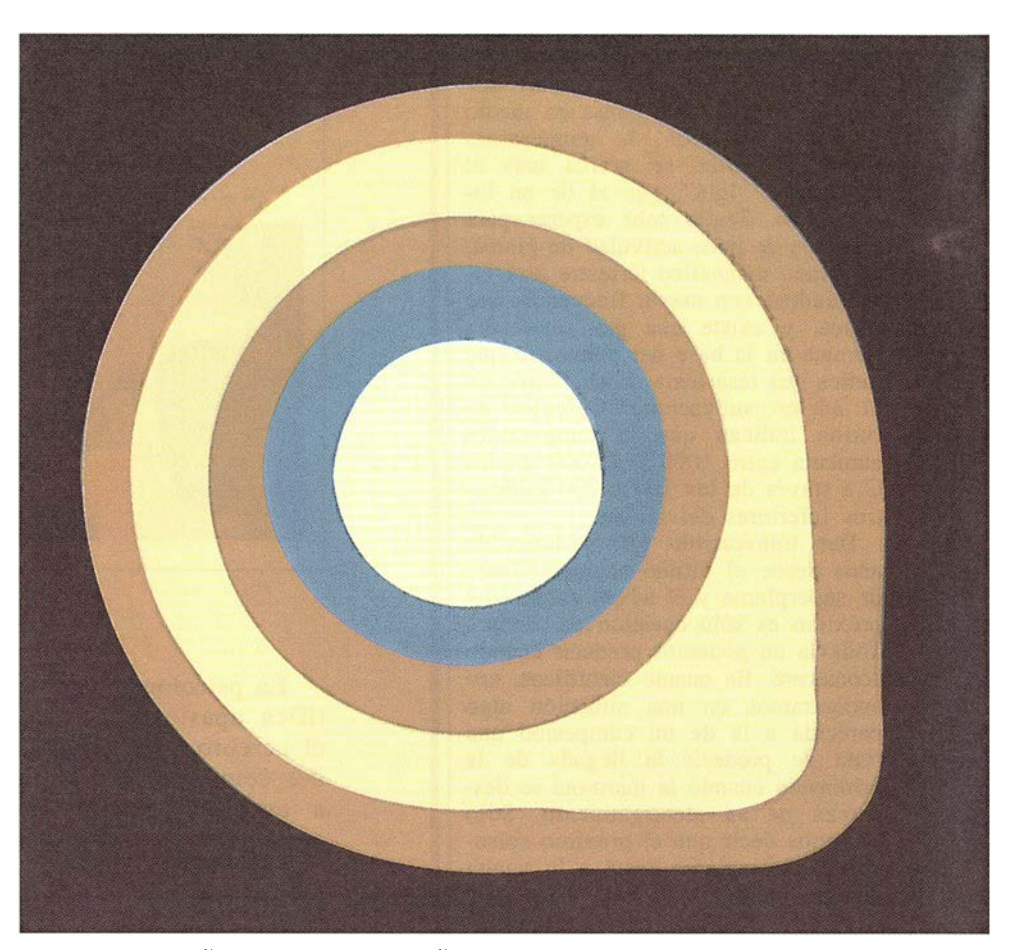
Gary Stix

En febrero del año en curso, se presentó una pastilla ("chip") de memoria capaz de almacenar un gigabit (mil millones de bits) de información y un microprocesador que ejecuta más de mil millones de instrucciones por segundo. Se multiplica así por 1000 la capacidad y la potencia de procesamiento con respecto a lo conseguido en los comienzos de los años ochenta. Los expertos en circuitos de estado sólido esperan que continúe este incesante avance y sostienen que al final de la próxima década se hablará de pastillas de un terabit (un billón de bits) de capacidad.

El optimismo de los investigadores encubre las crecientes dificultades de convertir prototipos de laboratorio en productos comerciales. Conseguir videoteléfonos de bolsillo o sistemas de teleconferencia de alta definición dependerá de mantener un continuo progreso en las técnicas de fabricación de mayor volumen de todos los tiempos. Según Alec N. Broers, de la Universidad de Cambridge, "dentro de pocos años el coste de un circuito electrónico de memoria habrá caído en ocho órdenes de magnitud desde los años cincuenta, algo no igualado por ninguna otra técnica".

Pero es evidente el reto que implica elevar las velocidades y capacidades integrando muchísimos más transistores, de miniaturización creciente, en escasos centímetros cuadrados de silicio. Nunca nos hemos enfrentado a los límites de la física con tanta crudeza.

A los científicos e ingenieros que estudian los procesos litográficos de formación de imágenes, fundamentales en la fabricación de micropastillas, les está costando trabajo decidir cómo se ha de orientar el progreso técnico. Van a lanzarse al mercado unas refinadísimas pastillas de memoria cuya dimensión característica se ha reducido hasta los 0,35 micrometros —y todavía van a achicarse más. (Las pastillas de memoria siempre han ido por delante en miniaturización, aunque en los últimos años los microprocesadores tienden a acortar la ventaja.)



*1. LO PEQUEÑO SE EMPEQUEÑECE al comparar estos dos transistores. El primer transistor planar (***izquierda, visto desde arriba***), del año 1959, medía 764 micrometros de diámetro y podía distinguirse a*

En los comienzos de la próxima década, la industria de semiconductores proyecta comercializar pastillas de gigabits —hoy en el laboratorio— con un canal eléctrico, o puerta, de transistor de 0,1 a 0,2 micrometros de longitud. Este "cero coma uno" (en inglés "point one") se ha convertido en meta para las gentes de la ingeniería. Por donde quiera que se mire es una dimensión ínfima: la anchura de una hebra de ADN o la milésima parte del grosor de un cabello humano.

A escala tan diminuta, el proceso fotográfico que elabora la imagen de un circuito en la superficie de una pastilla comienza a desfallecer. Los patrones de circuito proyectados a través de lentes gigantes de coste superior a los cien millones de pesetas se difuminan con facilidad sobre la superficie de la pastilla. La luz ultravioleta incidente sobre ésta queda absorbida antes de que puedan grabarse imágenes de transistores, condensadores y conductores de tamaño submicrométrico.

La fotolitografía ha dejado atrás las predicciones más optimistas. Pero si la luz finalmente se desvanece, quizá no haya otro remedio que mirar hacia otra técnica; a ella han recurrido numerosos investigadores, de la universidad y de la empresa privada, durante más de veinte años.

Ya hay en los laboratorios pastillas de gigabits. Pero las técnicas exigidas para fabricar circuitos menores se enfrentan a un recorte de beneficios



simple vista. El transistor actual, visto de perfil por microscopio electrónico de transmisión (**derecha*****), mide unos dos micrometros de diámetro y tiene elementos de sólo 0,4 micrometros.***

Hablo de la litografía basada en los rayos X, con longitudes de onda nanométricas; podría ser el único medio de diseñar circuitos con miles de millones de transistores. IBM, AT&T y Motorola decidieron, el último otoño, compartir los costes de desarrollo necesarios para llevar la litografía por rayos X a la fábrica.

Los abanderados de la fabricación de pastillas por rayos X no han ganado muchos adeptos, ni siquiera entre los especialistas litógrafos de sus propias empresas. De hecho, los elevados costes y la inseguridad técnica que rodea a la litografía por rayos X ha movido a los grupos industriales a plantearse invertir de 40.000 a 50.000 millones de pesetas en una campaña intensiva para llevar la litografía óptica tradicional a un nivel que permitiera fabricar pastillas de un gigabit de memoria, con mil millones de transistores, o microprocesadores que operen miles de millones de veces por segundo. Hay quien cree que la supervivencia está vinculada a la litografía óptica.

Las tensiones entre estos dos bandos han desencadenado un pugilato por obtener financiación, cada vez más escasa, del estado. "El dinero gastado en litografía por rayos X ha sido a expensas de la litografía óptica avanzada", afirma John R. Carruthers, director de investigación de componentes en Intel. Si se hallara algún medio para que prevalecieran las técnicas ópticas, el enorme esfuerzo de desarrollo en litografía por rayos X podría darse por perdido sin haber llegado a vender ni siquiera un transistor en el mercado.

Estos antagonismos entre los partidarios de las dos tecnologías —unidos a las dudas suscitadas por multitud de problemas vinculados a la fabricación de circuitos de dimensiones tan minúsculas— podrían imprimir mayor lentitud a los ciclos de tres años que vienen a transcurrir de una a otra generación de circuitos de memoria y microprocesadores. A escala mundial, esta tendencia tendría un trágico impacto sobre una industria de semiconductores que factura más de 13 billones de pesetas y espera duplicar estos ingresos hacia el año 2000. La industria tiene que encontrar la manera de lograr aumentos de productividad que no sean a costa de forzar más la miniaturización de los componentes. De lo contrario, podría desaparecer la espectacular reducción de costes por unidad de memoria o de lógica que se logra en cada generación sucesiva de pastillas.

Desde el punto de vista de la física básica, el tipo de pastilla predominante, el semiconductor de metal-óxido, podría seguir funcionando hasta dimensiones de sólo 0,03 micrometros, menos de la décima parte de lo que mide el circuito más avanzado cuya fabricación esté prevista. Por debajo de tal dimensión, los transistores podrían tener dificultades operativas. Más que como conmutadores, se comportarían como grifos que gotean: los electrones podrían moverse, sin control, de un lado a otro del transistor.

Pero las dificultades de fabricación podrían obligar a abandonar esas nuevas técnicas. Cuando hay millones de transistores interconectados, los conductores deben apilarse como en una autopista de múltiples carriles; la resistencia eléctrica de estos hilos de pequeño diámetro y la distancia que debe recorrer una señal determinan que las operaciones sean

más lentas. Hay que estar alerta con las partículas de 60 nanómetros, llamadas "asesinas", capaces de arruinar la memoria o lógica de un dispositivo "inteligente". Construir pastillas tan pequeñas requiere fábricas muy vastas: el coste de las instalaciones de fabricación de tecnología más avanzada tiende a colocarse entre 250 y 300 mil millones de pesetas. De todos estos obstáculos, sin embargo, uno de los más temibles consiste en pretender exprimir más la litografía.

La fotolitografía es heredera de un proceso de impresión inventado en el siglo XVIII por un inspector de mapas alemán. En él se canaliza la luz a través de una máscara, una placa de cuarzo recubierta con líneas de cromo que configuran el diagrama de un circuito. La luz pasa seguidamente a través de uno de los sistemas ópticos más refinados del mundo: 30 o más lentes cuyo coste supera los 100 millones de pesetas. Estas lentes minorizantes reducen la imagen a la cuarta o quinta parte de su tamaño original y la proyectan sobre unos pocos centímetros cuadrados de la oblea, disco de silicio de unos 200 milímetros de diámetro. Se expone a la luz una capa de polímero fotosensible de un micrometro de espesor, extendida sobre la superficie de la oblea. La mesa sobre la que se asienta la oblea "pasa" luego a otra posición, colocando otra zona de la oblea bajo el haz luminoso.

En la siguiente fase del proceso, los compuestos químicos del revelado arrastran la parte del polímero expuesta a la luz, o bien la que no se ha expuesto (dependiendo de las necesidades del fabricante). El patrón de circuito trazado sobre el polímero de revestimiento se transfiere a la superficie de la oblea por un proceso de grabado químico. Este trazado litográfico marca con sumo detalle dónde han de implantarse impurezas (boro o arsénico) en la pastilla para alterar la conductividad eléctrica de los elementos del circuito, en un proceso de dopado. La litografía permite también definir las zonas donde han de colocarse hilos metálicos para conectar los elementos de circuito. Terminada la oblea, se corta ésta en pastillas individuales que se encapsulan en cerámica o plástico.

La generación de pastillas de gigabits quizá llegue a intentar forzar los límites de la litografía óptica. Para fabricar estas pastillas, se ha adoptado una litografía basada en un láser de pulsos (láser excímero) que emite una luz de longitud de onda corta, de sólo 0,193 micrometros, en la región espectral del ultravioleta extremo. Ahora bien, a longitudes de onda por debajo de 0,2 micrometros el polímero absorbe luz en tan gran proporción que hace más lenta la implantación del patrón en la pastilla. Esto puede imposibilitar el procesamiento económico de muchos cientos de obleas por hora, producción habitual de una gran fábrica.

Se han identificado materiales con los que podrían fabricarse lentes para 0,193 micrometros, pero su comportamiento es muy deficiente. El vidrio de sílice fundida de las lentes tiende a absorber la luz y a calentarse, con lo que varía el ángulo de refracción y puede degradarse la imagen.

Los litógrafos afrontan la formidable tarea de construir estructuras menores que la longitud de onda de la luz. Se han escogido longitudes de onda de 0,193 e incluso de 0,248 micrometros para realizar estructuras de 0,180 destinadas a las pastillas de gigabits. "Es como pintar una línea que ha de ser más estrecha que la anchura del pincel", dice Steven D. Berger, de los Bell. "Hay maneras de conseguirlo, pero muy pocas de ellas sujetas a control. En litografía no se hacen las cosas una sola vez, sino 10^{10} veces en un segundo."

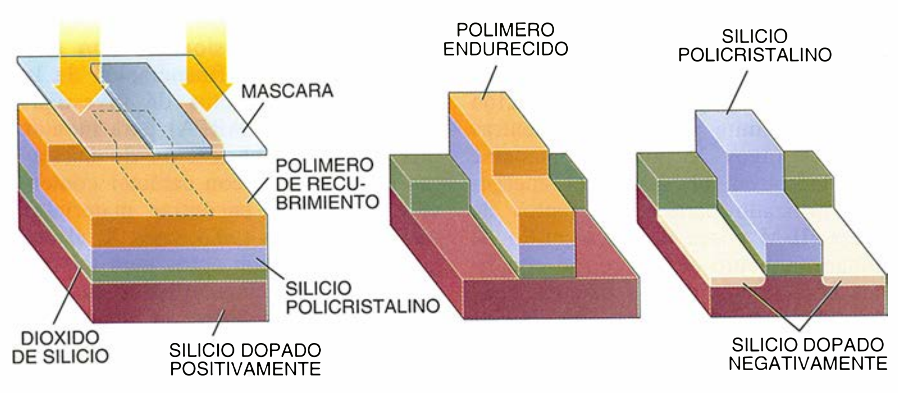
Al trabajar en longitudes de onda tan ínfimas aparecen otros problemas. La producción de micropastillas sigue una ley básica de óptica conocida por todo fotógrafo. Una gran apertura de la lente aumenta la resolución: se pueden distinguir los cabellos sueltos de un niño o los minúsculos componentes de una pastilla. Pero paralelamente disminuye la profundidad de campo, y a un fotógrafo aficionado es fácil que se le desenfoque el plano posterior. En fotolitografía, a través de lentes con aperturas gigantes, el foco de la imagen proyectada empieza a difuminarse a distancias muy inferiores al micrometro. En consecuencia, el foco no permanece nítido al recorrer el accidentado perfil microtopográfico de una pastilla de gigabit. El número de pastillas defectuosas puede entonces subir a las nubes, y el rendimiento de la producción caerá por debajo de los límites económicamente tolerables.

Los especialistas en óptica piensan recurrir a "trucos", que posibilitan el grabado de dimensiones aún más diminutas sin reducir la profundidad de campo. Uno de los sistemas emplea máscaras que alteran la fase de la luz que las atraviesa, lo que mejora la resolución de las líneas del 50 al 100 por ciento. Estas máscaras de desfasaje, costosas y difíciles de fabricar, no pueden utilizarse con todos los patrones geométricos que se imprimen en el polímero fotosensible. Sin embargo, Intel tiene en proyecto aplicar alguna de estas técnicas, a partir del 2001, para construir un nuevo microprocesador cuya dimensión mínima sea de 0,18 micrometros.

2. EL DESARROLLO DE LA LITOGRAFIA reclama luz de longitudes de onda cada vez más cortas y nuevas formas de energía electromagnética para producir pastillas con mayor capacidad de memoria. La sucesión de generaciones de pastillas exigirá desplazarse hacia luz ultravioleta de menor longitud de onda aún, y tal vez después a los rayos X o a haces de electrones.

3. LA MAQUINA DE PASOS fotolitográfica imprime patrones de circuito en obleas de silicio. La luz ultravioleta procedente de una lámpara de arco (o de un láser) atraviesa una máscara que contiene la imagen del circuito. Un refinado sistema de lentes reduce la imagen y la proyecta sobre parte de la oblea. La mesa avanza luego un paso para exponer otras pastillas.

El problema de la profundidad de campo ha suscitado nuevas vías para abordar la capa fotosensible. La formación superficial de imágenes permite sólo la exposición de las micras de la capa superior del polímero, en lugar de un micrometro como es usual. Una vez expuesto el polímero fotosensible, se introduce en una cámara de vacío donde entra en contacto con un gas que contiene silicio. En una de las posibles soluciones, las zonas no expuestas absorben el silicio y éste actúa a modo de barrera que protege la capa subyacente de la acción de un gas de oxígeno ionizado. Este gas ataca las partes de la pastilla expuestas a la luz, y penetra en ellas todavía más que el finísimo espesor originalmente expuesto. Además de mejorar el material fotosensible, los fabricantes intentan salvar el escollo de la profundidad de campo pulimentando o aplanando la cara superior de la pastilla con un cemento químico; se enfoca mejor sobre una superficie lisa.



4. LA FORMACION de un transistor por litografía implica la proyección de luz a través de las partes transparentes de una máscara de cuarzo (*izquierda*). El polímero, que reviste la oblea de silicio, reacciona ante la luz; las zonas expuestas se eliminan luego con un disolvente. Un plasma iónico ataca a través de la capa conductora de silicio policristalino y la capa aislante de dióxido de silicio (*centro*); el resto del polímero de recubrimiento se elimina. En el silicio (*zona rosa*) se implantan impurezas, como el arsénico. Los electrones libres de esta zona "de dopado negativo" conducen corriente (*derecha*).

En el laboratorio Lincoln del Instituto de Tecnología de Massachusetts se ha probado un prototipo de sistema litográfico en el que se emplea luz de 0,193 micrometros. Pero los prototipos no bastan; tienen que dar paso a máscaras y polímeros fotosensibles que pueda comprar la gente. Por ello se está estudiando la construcción de una fábrica base en la que se produzcan pastillas con luz de los últimos confines del espectro ultravioleta.

La investigación sobre litografía a 0,193 micrometros lleva tres años de retraso con respecto al calendario de introducción de las pastillas de gigabits en el mercado, que sería a principios de la próxima década. Lo que no puede saberse es si este proceso podrá producir millones de pastillas al año. En palabras de David A. Markle, del fabricante californiano Ultratech Stepper, "se corre el riesgo de que la litografía a 0,193 no resulte practicable; debemos introducir nuevas técnicas que sustituyan a la óptica convencional, y todavía no está claro cuáles van a ser".

El propio Departamento de Defensa norteamericano ha fomentado la litografía por rayos X para conseguir micropastillas de alta prestación, y también IBM, compañía que asumió el compromiso de desarrollar una nueva técnica de fabricación de semiconductores. Pero IBM ha reconocido que ya no puede proseguir sola por este camino, y se ha unido con AT&T, Motorola y Loral Federal Systems (antiguo subcontratista de IBM) para intentar sacar la litografía por rayos X de la esfera del laboratorio.

En principio, esta técnica debe ser una opción natural para el trazado de elementos de circuito más finos. En efecto, la longitud de onda de los rayos X es aproximadamente de un nanómetro (10^{-9} metros), unas cuatrocientas veces menor que la utilizada en los sistemas comerciales ópticos más avanzados de hoy día.

Difieren bastante, sin embargo, las técnicas puestas en juego para la producción y aprovechamiento de los rayos X, y es aquí donde se inicia el debate sobre la viabilidad de esta técnica litográfica. La radiación óptica se emite por láseres, mientras que los rayos X podrían obtenerse del sincrotrón, un generador energético utilizado para experimentos de física. IBM posee el único anillo de almacenamiento de sincrotrón con fines comerciales de los Estados Unidos. Está formado por dos imanes superconductores cuyo campo confina los electrones en una órbita cerrada. Al circular por el interior del anillo, los electrones emiten radiaciones X. Por el lado japonés, Sortec, un consorcio del gobierno y la industria, trabaja asimismo en el desarrollo de la litografía por rayos X.

El precio estimado —de 3000 a 6000 millones de pesetas— de estos generadores de rayos X no debería impedir su adquisición. Estas cantidades no superan el 3 por ciento del coste de las más modernas plantas de semiconductores. Además, un sincrotrón puede alimentar 16 máquinas posicionadoras de pasos, como la anteriormente descrita. No parece insensato un desembolso de 3000 millones para conseguir un fuerte aumento de la capacidad productora.

Pero el problema está en que, si una compañía necesita un *ligero* aumento de su capacidad fabril, ha de invertir los mismos 3000 millones. En busca de solución, AT&T explora, colaborando con IBM, el desarrollo de rayos X a partir de un plasma generado por láser que alimenta una sola máquina de pasos. Al no haber ningún suministrador comercial de todo el conjunto de equipos, AT&T utiliza una máquina fabricada por una compañía, Hampshire Instruments, que cerró en 1993.

Otra dificultad técnica surge de la falta de un sistema comercial de enfoque de los rayos X. Dado que las máquinas de pasos para rayos X carecen de algo que pueda equivaler a las lentes o a los espejos reductores, las máscaras deben asumir una carga de ingeniería mayor: cada elemento de circuito trazado sobre la máscara debe tener el mismo tamaño minúsculo que la estructura a grabar en la pastilla.

Esta incapacidad de reducir la imagen complica, además, el proceso de alinear una imagen de máscara sobre otra. Fabricar una pastilla de gigabit requiere unas 20 etapas litográficas, cada una con su máscara individual. Hasta ocho de tales etapas exigen alinear las máscaras de rayos X con tolerancias de pocas decenas de nanómetros, precisión mecánica muy difícil de conseguir.

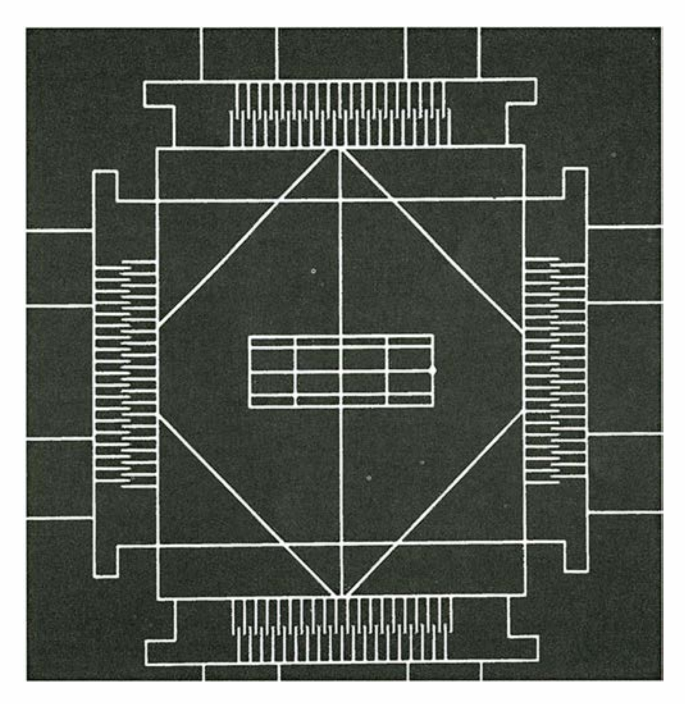
Pese a todo, IBM se dispone a abordar este impresionante reto técnico. Ha obtenido financiación de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados (ARPA) para montar una planta de fabricación de máscaras para rayos X con carácter comercial. Es difícil encontrar materiales que absorban las radiaciones X; el oro y el tungsteno son aptos para tal fin. Pero hay que depositarlos en proporciones extrañas sobre la membrana de silicio transmisora de la radiación. Por ejemplo, para que un elemento de circuito de oro absorba rayos X ha de tener una altura de 0,4 a 0,5 micrometros, pero su anchura sólo debe ser, por ejemplo, de 0,1 micrometros, con lo cual el perfil de la pastilla puede asemejarse al horizonte de rascacielos neoyorquino.

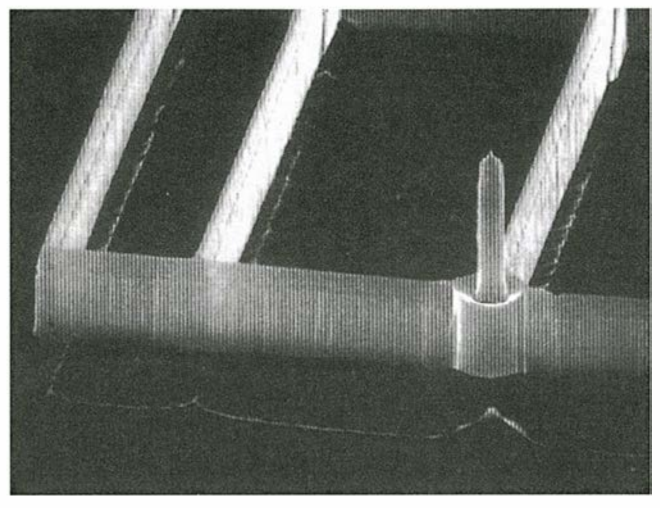
La falta de confianza en el futuro de la litografía óptica mantiene viva la investigación en los rayos X, aunque quizás el tiempo ya apremia. AT&T, Motorola y Loral Federal Systems han concedido legitimidad duradera a los trabajos de desarrollo sostenidos durante años por IBM, que había comenzado a perder el respaldo financiero de organismos estatales. La propia IBM, tras haber gastado decenas de miles de millones de pesetas en rayos X, mira hacia atrás con cierto pesar: "Ahora comprendemos que nuestro trabajo en litografía por rayos X se inició demasiado pronto", escribía en 1993 Eberhard Spiller, un pionero de esta tecnología, en el *IBM Journal of Research and Development.*

Los expertos en litografía podrían ver con mejores ojos la técnica basada en los rayos X, si esta clase de radiación admitiera la reducción de imagen a través de lentes. La concepción de una lente para rayos X es la meta de uno de los más avanzados proyectos en litografía. Este sistema "proyector" de rayos X trata de aplicar técnicas desarrolladas, en parte, para la fabricación de pastillas en la Iniciativa de Defensa Estratégica.

La litografía por rayos X pretende, asimismo, cumplir el objetivo de que, superada la guerra fría, los laboratorios de armamento nuclear y energía del gobierno de EE.UU. se hagan cargo de varios de los compromisos de investigación básicos que hasta ahora asumían los laboratorios Bell y los de IBM. La experiencia en láseres y mediciones de los laboratorios estatales podría muy bien aprovecharse en la litografía.

Tres laboratorios —Sandia, Lawrence de Berkeley y Lawrence de Livermore— han encabezado un proyecto de desarrollo de un sistema de proyección por rayos X para exponer elementos de pastilla de no más de 0,1 micrometros. Entre otras compañías, Intel y AT&T han sido invitadas a aportar su apoyo, experiencia y medios de prueba para este programa. El método que sigue el consorcio consiste en dirigir un haz láser de alta potencia sobre un blanco metálico con el fin de generar rayos X, que iluminan luego una máscara reflectante. La energía resultante rebota entre una serie de espejos que





5. LA LITOGRAFIA DEL FUTURO podría utilizar este motor de 200 micrometros (*izquierda*) de la Universidad de Cornell, que incorpora una punta de silicio de 20 nanómetros de diámetro (*primer plano, a la derecha*). La capacidad de hacer avanzar, retroceder o desplazar lateralmente la punta podría ser precursora de herramientas litográficas con muchas puntas que configuraran la superficie de una pastilla.

reducen la imagen al tamaño de la pastilla dentro de la oblea. En el Japón, Nikon y Hitachi también investigan en esa misma línea técnica.

La fabricación comercial de microprocesadores por este sistema puede resultar tan onerosa como el seguimiento y derribo de un misil balístico que se aproxima. Alternando capas de silicio y molibdeno, se han creado materiales que reflejan las radiaciones X, en vez de absorberlas. Queda no obstante la gravosa tarea de pulimentar y revestir los espejos con tolerancias especificadas a niveles de angstroms. Además, hay que mantener este alto grado de uniformidad en superficies de muchos centímetros cuadrados.

Un signo revelador del estigma que ha recaído sobre la litografía por rayos X es que hoy los científicos califican como del "ultravioleta extremo" a las radiaciones utilizadas en estos experimentos, que anteriormente llamaban "rayos X blandos".

No deja de sorprender que la técnica capaz de obtener las estructuras de pastilla mínimas se emplee ya de forma rutinaria en fabricación. La litografía por haz electrónico emplea un "lápiz" de partículas cargadas para trazar líneas directamente sobre una capa fotosensible. De hecho, las empresas aplican esta técnica al trazado de patrones de circuitos sobre máscaras fotolitográficas. Desde hace más de veinte años sueñan con utilizarla en litografía de grandes series. Por desgracia, los haces electrónicos son exasperantemente lentos: el "lápiz" debe trazar cada elemento del patrón de circuito por separado, en vez de exponer a un destello de luz toda la superficie de la pastilla. Puede tardarse horas en fabricar una sola pastilla, lo cual no es tolerable para una producción masiva, aunque sí se aplica a la obtención de dispositivos electrónicos de alta calidad que no utilizan silicio.

Desde el final de los ochenta, los laboratorios Bell han estudiado un método para barrer la superficie de la pastilla con un haz electrónico amplio. Igual que en la fotolitografía, la radiación se proyecta a través de una máscara y la imagen se reduce por medio de una lente. AT&T considera que la técnica de barrido por haz electrónico es la más prometedora a largo plazo para litografía. Todavía queda más lejos una técnica litográfica que desarrolle lo que podría llamarse —todavía en estado embrionario— nanotecnología. En teoría, con herramientas microscópicas se podrían formar los transistores de silicio más diminutos, cuyas dimensiones mínimas midieran sólo decenas de nanómetros. Se configuraría, además, un tipo de electrónica enteramente nuevo, en el que se almacenaría o procesaría la información detectando la posición de átomos individuales.

Tales herramientas pueden obtenerse por litografía óptica convencional. Primero se trazan sobre el silicio los contornos de cientos o incluso miles de cátodos. Se aplica luego tensión a tales cátodos, y éstos generan haces de electrones capaces de trazar líneas de circuito de anchura inferior a 0,05 micrometros. El profesor MacDonald, de la Universidad de Cornell, ha construido una red de 1000 cátodos, que proporciona en una pastilla las bases para una máquina de haz electrónico.

MacDonald prevé que la técnica se aplicará a la construcción de máscaras, y quizá posteriormente a la propia fabricación de micropastillas. Junto con Yang Xu y Scott A. Miller, ha demostrado que un microscopio de barrido de efecto túnel puede integrarse con motores de 200 micrometros de anchura, fabricados también por métodos fotolitográficos. La aguzada punta del microscopio de barrido se ha utilizado en centros de investigación para presionar en torno a los átomos. Los micromotores pueden hacer que una red de miles, o incluso millones, de esas puntas configuren una superficie con la rapidez suficiente para la fabricación comercial de líneas de circuito de sólo nanómetros.

Las redes de cátodos o los microscopios de barrido son ejemplos de los proyectos de investigación litográfica más avanzados. Pero todavía no han pasado de la fase experimental, ni han desembocado en equipos que puedan adquirir los principales fabricantes de electrónica integrada.

Tal vez solamente una o dos de estas técnicas penetren en la fábrica. Es claro que cuesta demasiado superar ese nivel. Las inversiones que requiere la litografía en gran escala tal vez exijan la colaboración industrial de empresas competidoras, dirigidas tanto desde Tokio como desde Silicon Valley.

Ciencia y empresa

Género y trabajo

En España

No es lo mismo diferencia que desigualdad. Tampoco diferencias de sexo y desigualdades de género. Bajo esa inocua distinción semántica se esconde un cambio de perspectiva epistemológica fundamental, que supone sacar la cuestión de las desigualdades sociales del campo de la biología y situarlo en el terreno de la sociología y de la historia. El término desigualdad nos remite a unas relaciones jerárquicas desde el punto de vista del poder social. El concepto de género alude a la construcción social que en un momento dado se hace de los roles masculinos y femeninos en la sociedad.

El análisis de la posición social de las personas desde una perspectiva que tome en consideración las desigualdades en razón del género, descubre las raíces sociales de la discriminación padecida por las mujeres, fenómeno que desde la mera óptica biológica tiende a darse por natural. El primer enfoque permite sentar las bases para replantear las relaciones sociales entre hombres y mujeres.

Centrémonos en las desigualdades que se producen en razón del género en el mercado de trabajo en España. Hombres y mujeres presentan niveles de actividad diferentes (la tasa de actividad es la proporción de una población dada que se declara activa, es decir, que dice trabajar o estar disponible para ello haciendo gestiones para incorporarse a la producción), trabajan en sectores, profesiones y con grados de cualificación diversos. En España los hombres presentan una tasa de actividad del 63 % y las mujeres del 36 %, según los datos de la Encuesta de Población Activa correspondientes al segundo trimestre de 1994.

Si atendemos a las tasas de actividad por edad se manifiestan diferencias importantes. En las mujeres los niveles de actividad fluctúan según la edad y son especialmente bajos en las edades centrales de la maternidad. En cambio, en el de los varones, la paternidad no parece afectar en nada los niveles de las tasas de actividad, que se mantienen constantemente altos en todas las edades hasta la jubilación. Ahora bien, se está incluido en la población activa estando ocupado o parado y si las mujeres presentan una tasa de paro del 31 % la de los hombres es del 20 %. Estas diferencias se mantienen entre los jóvenes, pues entre los 16 y 29 años la tasa de paro femenina es 10 puntos porcentuales más alta que la masculina.

Por otro lado, se observa una especialización ocupacional en función del género. Aunque las mujeres constituyen tan sólo el 33 por ciento de la mano de obra ocupada total, representan el 64 por ciento de la ocupación en educación, actividades sanitarias y servicios sociales, que suponen en conjunto el 20 por ciento de la ocupación femenina total y el 6 por ciento de la masculina. Contra lo que pudiera pensarse tras calcular el índice de segregación ocupacional entre 1988 y 1994, los resultados muestran la persistencia de la división sexual del trabajo.

Además de estos datos, que revelan lo que se ha dado en llamar "segmentación horizontal" del mercado laboral, existen otras cifras que avalan también la denominada "segmentación vertical", o jerarquía ocupacional en función del sexo. A modo de ejemplo pueden mencionarse los datos que la Encuesta Sociodemográfica de 1991, elaborada por el Instituto Nacional de Estadística, registra sobre las categorías laborales del personal administrativo empleado por cuenta ajena. Si bien es una ocupación equilibrada por sexos, pues se compone de un 50 por ciento de varones y de un 50 por ciento de mujeres, la categoría laboral más alta, la de "jefe", está compuesta en sus cuatro quintas partes por varones. De tal forma que, si la categoría de "jefe" constituye el 30 por ciento del personal administrativo masculino y las categorías más bajas, "auxiliar administrativo, aspirante o aprendiz", el 34 por ciento, entre las mujeres tan sólo un 8 por cien son "jefas" y, en cambio, el 62 por ciento se sitúan en las posiciones más bajas. Las escalas del personal administrativo presentan, por tanto, un perfil de cualificación mucho más bajo en el caso de las mujeres.

¿Son explicables estas desigualdades exclusivamente por diferencias formativas del capital humano de uno y otro sexo? Esta ha sido una justificación recurrente, que ha ocultado la raíz principal de las desigualdades sociales basadas en la discriminación en función del sexo, la clase o la raza. Así, la desigual posición de hombres y mujeres en el mercado laboral se atribuyó, en un primer momento, al diferente nivel educativo.

Sin embargo, cuando las mujeres acceden a la educación y alcanzan incluso niveles de instrucción más elevados que los hombres, se aduce como causa de la desigualdad la elección por parte de aquéllas de

INDICADORES DE DESIGUALDAD EN EL MERCADO DE TRABAJO EN ESPAÑA	MUJERES	HOMBRES
1. Tasas de actividad (25-49 años)	57,81	93,51
2. Tasas de actividad solteros/as (25-49 años)	83,63	86,66
3. Tasas de actividad casados/as (25-49 años)	49,78	96,78
4. Tasas de paro	31,41%	20,02%
5. Ocupados/as a tiempo parcial	15,24%	2,63%
6. Ocupados/as a tiempo parcial por obligaciones familiares	11,46%	1,07%
7. Ocupados/as como ayuda familiar	7,68%	2,63%
8. Ganancia media mensual de empleados/as, 1992	136.712 ptas	217.807 ptas
9. Ganancia media mensual de obreros/as, 1992	92.876 ptas	133.921 ptas
10. Tiempo dedicado a las tareas tradicionalmente femeninas en el hogar por trabajadores/as remunerados/as (1987)	4h.:48'	1h.:06'

Fuente: para 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (INE) *Encuesta de Población Activa 1994* (2º trimestre); para 8 y 9 (INE) *Encuesta de salarios en la Industria y Servicios 1992*; 10 (Instituto de la Mujer) *La mujer en cifras 1992.*

profesiones con poco futuro. Las mujeres optan en mayor proporción que los hombres por carreras en ciencias sociales-jurídicas y humanidades (un 70 % del total de las estudiantes frente a un 51 % de los estudiantes), mientras que los hombres escogen en mayor proporción carreras técnicas (un 17 % del total) en las que las mujeres están subrepresentadas (un 2 %). En la elección del futuro profesional subyacen, sin duda, las diferencias de socialización de los niños que aprenden en la escuela y en la familia los roles asignados a su sexo. La diferenciación curricular establece las bases para reproducir la segmentación ocupacional en el mercado laboral.

Pero este razonamiento dejaría sin explicar, por ejemplo, por qué los varones de primer ciclo titulados en ingeniería y tecnología presentan una tasa de paro del 12 por ciento, y las mujeres con la misma titulación del 26 por ciento, o que cuidar ancianos esté menos considerado, en la jerarquía socioeconómica de las ocupaciones, que vigilar coches en un aparcamiento.

Si bien las ideas y roles sociales están en proceso de cambio y reconversión hacia planteamientos más igualitarios, no se ha logrado superar la división jerárquica de la sociedad en dos esferas, productiva-masculino y reproductiva-femenina, surgida con el proceso de modernización que emerge tras la industrialización. La revolución industrial, que supuso la separación física de ambas esferas, es el punto de partida fundamental de la explicación de la subordinación de género en las sociedades occidentales contemporáneas. La incorporación de la mujer al mercado de trabajo no ha roto esta dicotomía, de forma que los costes sociales de la reproducción continúan siendo exclusivamente asumidos por un género.

Mª José González López
Rocío Treviño Maruri
Centro de Estudios Demográficos
Universidad Autónoma de Barcelona

Dos por uno

Caza de los genes PKD1 y TSC2

La genética humana ha conocido, a lo largo de los últimos años, una época de esplendor. Se han ido identificando los genes responsables de las enfermedades hereditarias más comunes, al menos las monogénicas o causadas por mutaciones de un solo gen. Podemos ya abordar desde una nueva óptica molecular la distrofia muscular de Duchenne, la fibrosis quística, la enfermedad de Huntington, el síndrome X-frágil, neurofibromatosis, esclerosis tuberosa, poliquistosis renal del adulto y ciertas formas hereditarias de cáncer mamario.

En el laboratorio de Peter Harris, del Instituto de Medicina Molecular de la Universidad de Oxford, hemos participado en esa onda y conseguido la identificación de dos genes relacionados con enfermedades: PKD1 y TSC2; el primero se halla alterado en la mayoría de los individuos con poliquistosis renal del adulto; TSC2 está implicado en la mitad de los casos de esclerosis tuberosa.

La poliquistosis renal del adulto constituye una de las enfermedades hereditarias más frecuentes; suele aparecer en 1 de cada 1000 individuos. La herencia es autosómica dominante, lo que significa que la probabilidad de que un hijo o hija de un afectado herede la enfermedad es del 50 %, aunque ésta se manifestará cuando el individuo alcance la edad adulta. Se caracteriza por la formación y desarrollo de quistes en ambos riñones, que provocan su deterioro y desembocan, frecuentemente, en fallo renal absoluto. Alrededor del 10 % de los pacientes que requieren terapia renal sustitutiva (diálisis o transplante) en España sufren esta enfermedad.

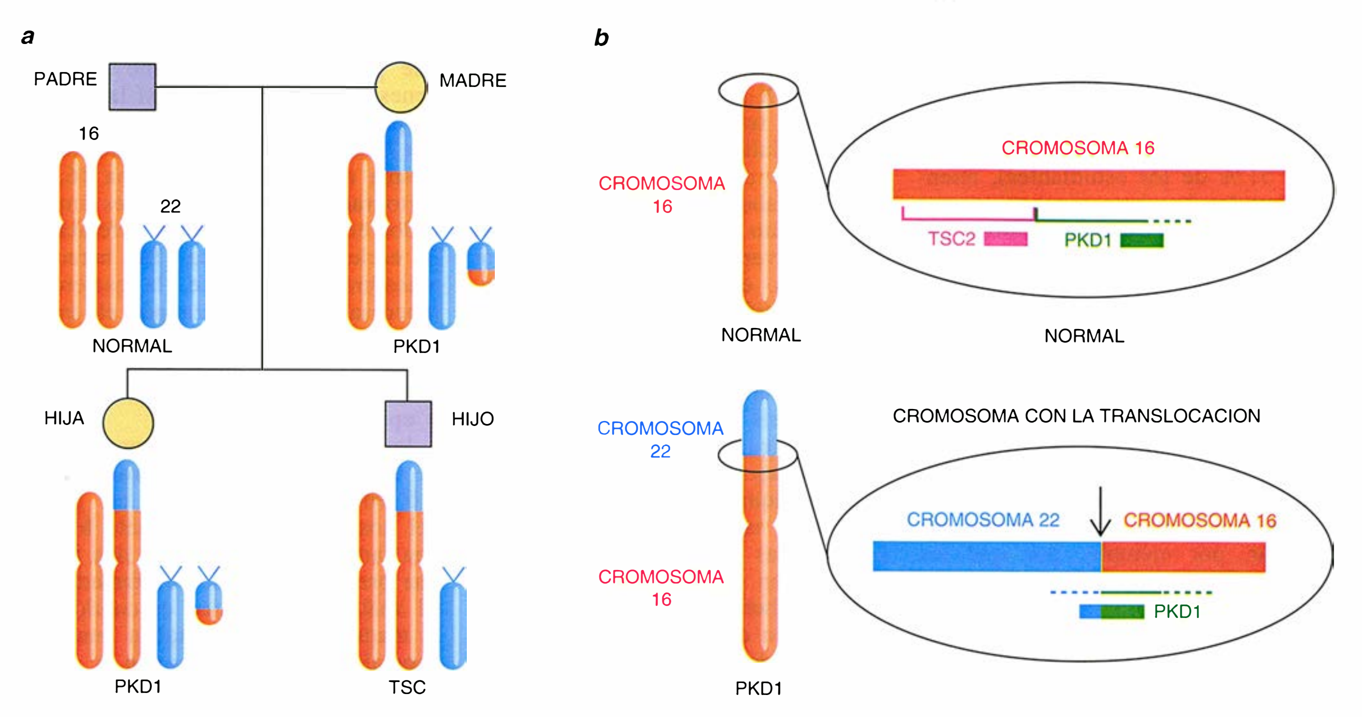
El primer indicio sobre la localización del gen responsable de esta enfermedad lo obtuvo en 1985 el grupo de Steve Reeders, de la Universidad de Oxford. Demostraron que la poliquistosis renal del adulto se heredaba ligada a los genes que determinan ("codifican") las proteínas α-globinas, genes que se habían descrito antes en la vecindad del telómero del brazo corto del cromosoma 16. En aquellas fechas, muy alejadas todavía del proyecto "Genoma Humano", los investigadores sabían muy poco sobre dicha región; apenas si se habían cartografiado algunos genes en el cromosoma 16 (ahora hay 127 genes asignados a este cromosoma). Hacia 1990 se empezó a establecer un mapa genético y físico de la región y, en 1992, el área de ADN "candidata" se había circunscrito a unas 600.000 pares de bases. Un hito, sin duda, considerando que el cromosoma 16 tiene unos 100 millones de pares de bases (pb) de ADN.

Pero la tarea no había acabado todavía, ya que un gen humano ocupa como media 20.000 pb. Además, en la región candidata se detectó la presencia de muchos genes, pegados casi unos a otros, lo que complicó más la búsqueda. Se hacía necesaria una pista, una mutación reconocible, que permitiera asociar uno de esos genes a la enfermedad. Así las cosas, se produjo un punto de inflexión en esa línea investigadora cuando, en la misma región del cromosoma 16, se cartografió uno de los genes implicados en otra enfermedad hereditaria, la esclerosis tuberosa. De herencia autosómica dominante, la esclerosis tuberosa se caracteriza por el crecimiento de tumores benignos (hamartomas) en diferentes órganos; frecuentemente provoca retraso mental y epilepsia.

Julian Sampson, del Departamento de Genética Médica en Cardiff, estudió en colaboración con un grupo del hospital lisboeta de Santa María, una familia portuguesa con dos hijos, que presentaba las dos enfermedades. El análisis citogenético descubrió que la madre y la hija portaban una rara anomalía: una translocación o intercambio de material genético entre el brazo corto del cromosoma 16 y el cromosoma 22. Madre e hija tenían síntomas de poliquistosis renal del adulto. El hijo, sin embargo, con claros signos de esclerosis tuberosa, había perdido el final del brazo corto de uno de sus cromosomas 16. Este descubrimiento implicaba que el punto de rotura en la traslocación había interrumpido el gen PKD1, mientras que la región del cromosoma 16 perdida en el hijo contenía el gen de la esclerosis tuberosa. Esta era la pista que buscábamos y que nos permitió encontrar ambos genes.

El aislamiento del gen de la esclerosis tuberosa, TSC2, se vio facilitado por la existencia de numerosos pacientes que presentaban deleciones de fragmentos de ADN en esa región. De acuerdo con lo esperado, este gen se localiza cerca del punto de translocación en la familia portuguesa, hacia el telómero.

La identificación del gen PKD1 ocurrió al poco tiempo. Dado que disponíamos de un buen mapa físico de la región, no tardamos en cartografiar el punto físico donde había ocurrido la translocación. Localizamos un gen, entre los varios de la región, que cruzaba ese punto de rotura: era nuestro candidato al gen PKD1. Para confirmarlo, necesitábamos encontrar mutaciones en su secuencia que se asociaran con la enfermedad en las familias afectadas. Una búsqueda exhaustiva en más de 300 pacientes nos permitió identificar tres mutaciones en ese gen: habíamos identificado el gen PKD1. Hoy son ya doce las mutaciones encontradas, seis de ellas son grandes deleciones que también afectan al



*Pedigrí de la familia portadora de la translocación entre los cromosomas 16 y 22 que nos facilitó la identificación de ambos genes (*a*) y estructura de la región del cromosoma 16 donde se localizan los genes TSC2 y PKD1 (*b*). En la parte inferior se muestra la forma en que el punto de rotura de la translocación afecta al gen PKD1*

gen TSC2, razón por la cual los individuos padecen ambas enfermedades.

Del gen TSC2 sabemos que cubre una región de 45.000 pares de bases y produce un ARNm de 5500 nucleótidos. La tuberina codificada por este gen presenta cierta homología con otras proteínas implicadas en la regulación del crecimiento celular.

El gen PKD1 se halla en una región de 60.000 pb. Codifica un ARN mensajero de 14.500 nucleótidos (uno de los mayores identificados hasta el momento). Debido a su gran longitud y a que parte del mismo está duplicado en otra región del cromosoma 16, aún no se conoce la secuencia entera de ADN. Trabajamos en ello con el propósito último de establecer la composición de la proteína codificada por el gen y, por tanto, su función en la célula.

El hallazgo de que los genes responsables de dos enfermedades genéticas frecuentes, poliquistosis renal del adulto y esclerosis tuberosa, se encuentran adyacentes en el cromosoma 16 es un hecho sorprendente. Sin embargo, la identificación de un gen constituye sólo el primer paso. El conocimiento de la estructura de la proteína codificada por ese gen, de su función normal en la célula y del modo en que le afectan las mutaciones reviste el mayor interés para comprender la base molecular de la enfermedad. Esperamos que un mejor conocimiento de las primeras etapas de la formación del quiste o de los hamartomas (en esclerosis tuberosa) aclare el proceso completo de ambas enfermedades y facilite el desarrollo de terapias eficaces

M. BELÉN PERAL
MRC, Oxford

Aislantes eléctricos

Oxidos electroópticos

Entre los cristales que son aislantes eléctricos, los óxidos ocupan un lugar preeminente. Constituyen con frecuencia los materiales más idóneos para múltiples aplicaciones: dieléctricos para condensadores y aislamiento eléctrico, moduladores de luz electroópticos y acustoópticos, cristales láser, detectores de radiación y partículas, sensores, etcétera.

Existe toda una gama de composiciones, estructuras y propiedades, con tipos de enlace que van de los iónicos a los covalentes. Incluso para una composición química nominal, es posible, en muchos casos, controlar la estequiometría, o composición química, del material dentro de márgenes muy amplios y así gobernar sus propiedades físicas. Cabe mencionar como ejemplo significativo que, según la estequiometría (concentración de vacantes de oxígeno), ciertos óxidos pueden convertirse en conductores e incluso en superconductores de alta temperatura.

En optoelectrónica existen aplicaciones muy interesantes de los óxidos que aprovechan las propiedades electroópticas y no-lineales. Varios cristales —así el $KTiOPO_4$(KTP), el BaB_2O_4(BBO) y el $LiNbO_3$— se usan comercialmente en moduladores de intensidad luminosa y en conversores paramétricos de frecuencia. La respuesta electroóptica implica un cambio en el índice de refracción del cristal (es decir, en la velocidad de propagación de la luz) bajo la acción de un campo eléctrico aplicado. Para que el efecto sea de magnitud elevada (efecto Pockels), se requiere que el cristal carezca de centro de simetría, como es el caso del $LiNbO_3$ o del $BaTiO_3$ a temperatura ambiente. En estas condiciones, el material es asimismo no-lineal y permite generar el segundo armónico de un haz luminoso incidente. De estas dos propiedades derivan las aplicaciones mencionadas a moduladores de luz y conversores paramétricos de frecuencia.

En el Departamento de Física de Materiales de la Universidad Autónoma de Madrid, los autores llevan trabajando más de quince años en el crecimiento y caracterización de óxidos electroópticos, fundamentalmente del niobato de litio, así como BGO y BSO. En particular, se ha realizado un esfuerzo considerable en el estudio de la propiedades fotorrefractivas del $LiNbO_3$ y su conexión con la estructura de sus defectos.

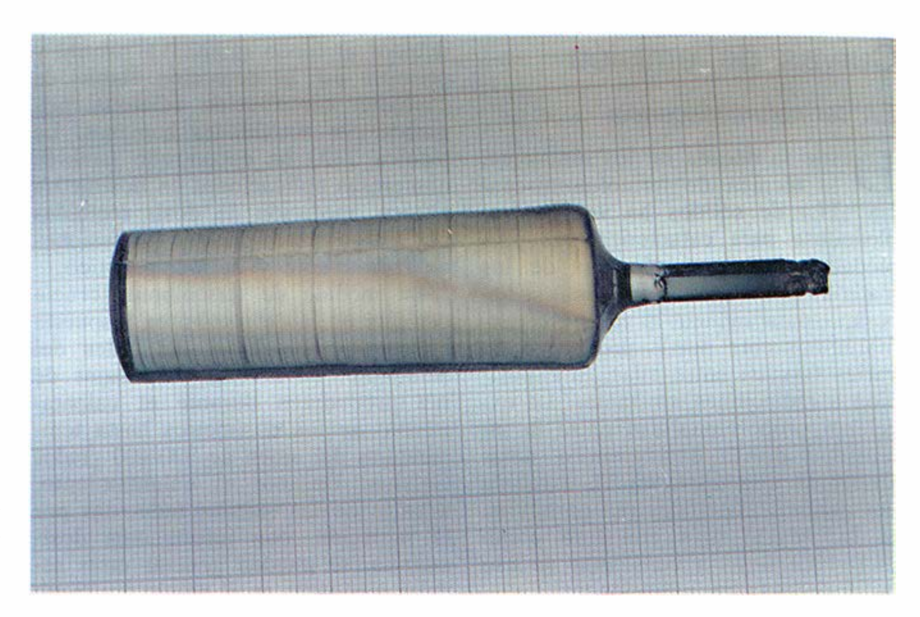
El efecto fotorrefractivo es un fe-

nómeno no-lineal que resulta de la sinergia entre el comportamiento electroóptico y la fotoconductividad, es decir, de la disminución de resistividad eléctrica inducida por iluminación. Requiere la presencia de impurezas o centros donadores y aceptores de electrones (o huecos), de modo que, cuando el material se somete a una iluminación inhomogénea, se genera un campo eléctrico interno de carga espacial. Debido al carácter electroóptico del material, la distribución generada de campo se traduce en un patrón de índice que está correlacionado con el perfil de la intensidad luminosa incidente. El conocimiento preciso de este proceso y su optimización requieren identificar las impurezas activas y saber dónde se sitúan en la red cristalina. Esta información es necesaria para hacer comerciales las innumerables aplicaciones propuestas en los campos de procesado óptico de información, ordenadores ópticos, amplificadores de señal e imagen, óptica adaptativa, metrología industrial y otros.

En el caso del niobato de litio las impurezas activas son elementos de transición con varios estados estables de valencia (fundamentalmente Fe^{+2} y Fe^{+3}); pero se desconocía su localización en la red, a pesar del esfuerzo investigador desarrollado y del uso de diversas técnicas espectroscópicas tradicionales.

Para resolver este problema se ha llevado a cabo un programa sistemático de experimentos, utilizando la espectroscopía de haces de iones, en colaboración con el grupo del profesor José C. Soares, de la Universidad de Lisboa. Los experimentos se realizan mediante la técnica de canalización, comparando el número de partículas retrodispersadas según que el haz de iones esté o no alineado con algún canal cristalográfico. Se ha puesto de manifiesto que todas las impurezas de transición y tierras raras examinadas (excepto el Ta) ocupan posición de Li, aunque en ciertos casos se ha detectado un fuerte desplazamiento del ion a lo largo del eje *c*, así como formación de precipitados. En particular, está ahora definitivamente demostrado que el Fe, que es la impureza fotorrefractiva más eficiente, ocupa posición sustitucional del Li.

Por otra parte, y con el fin de investigar los defectos intrínsecos en $LiNbO_3$, el grupo de Eric Hodgson, del CIEMAT de Madrid, ha realizado experimentos de irradiación con electrones de energía variable (0,2-1,6 megaelectronvolts). A partir del análisis de estos datos se ha demostrado la generación de vacantes de oxígeno y se han identificado las bandas ópticas asociadas.



Cristal de $LiNbO_3$ crecido en el departamento de física de materiales de la Universidad Autónoma de Madrid

Además de la caracterización estructural de los cristales, se han estudiado las cinéticas de grabado y borrado de redes holográficas de índice, así como los métodos para su fijado o estabilización, labor que han desempeñado José M. Cabrera, Luis Arizmendi y Mercedes Carrascosa en la Universidad Autónoma de Madrid.

Prácticamente la totalidad de los cristales de $LiNbO_3$ utilizados tanto en nuestro departamento como en otros laboratorios internacionales son congruentes, es decir, crecidos con deficiencia de Li (6 %). Hemos puesto a punto la técnica para el crecimiento de cristales estequiométricos en los que los procesos fotorrefractivos parecen estar fuertemente inhibidos. Sobre ellos se van a realizar los experimentos de caracterización física que permitan dilucidar las causas de este comportamiento, que puede tener notables implicaciones para los dispositivos optoelectrónicos fabricados con niobato de litio.

F. Agulló-López y E. Diéguez
Departamento de física de materiales
Universidad Autónoma de Madrid

IMPUREZA	OCTAEDRO	POSICION	TECNICA
TANTALO	NIOBIO	SUSTITUCION	RBS
HIERRO	LITIO	SUSTITUCION	PIXE
TITANIO	LITIO	SUSTITUCION	PIXE
HAFNIO	LITIO	SUSTITUCION	RBS
ERBIO	LITIO	PRECIPITADO	RBS
EUROPIO	LITIO	DESPLAZAMIENTO 0,4 ANGSTROMS	RBS
NEODIMIO	LITIO	DESPLAZAMIENTO 0,4 ANGSTROMS	RBS

RBS: ESPECTROMETRIA DE RETRODISPERSION DE RUTHERFORD
PIXE: EMISION DE RAYOS X INDUCIDA POR PROTONES

Localización de impurezas en la red del $LiNbO_3$

Curvas de emisión

En termoluminiscencia

Desde la década de los cincuenta, la técnica de termoluminiscencia (TL) de sólidos ha venido empleándose para caracterizar las propiedades ópticas y térmicas de los materiales. La excitación primaria necesaria para inducir la respuesta termoluminiscente puede producirse de varias formas; entre ellas, la exposición a radiaciones ionizantes. La excelente proporcionalidad entre la intensidad de la excitación o dosis absorbida y la respuesta TL exhibida por algunos materiales (en particular, el LiF:Mg,Ti más conocido como TLD-100) llevó a considerar su uso en dosimetría de radiaciones.

La dosimetría por termoluminiscencia (TLD) se desarrolló en la década de los setenta. Desde entonces se convirtió en el método de medida de dosis de radiación más empleado en dosimetría personal: control de las dosis recibidas por cada trabajador expuesto (en centrales nucleares, por ejemplo) y en dosimetría ambiental, cuyo objeto es controlar las dosis debidas al fondo radiactivo natural y permitir así la detección fiable de cualquier contribución adicional originada por actividades humanas. La técnica TLD ha encontrado también numerosas aplicaciones en dosimetría clínica: medición de dosis recibidas por los pacientes durante las sesiones de radioterapia y radiodiagnóstico.

La medida de termoluminiscencia consiste en la detección, en respuesta a energías absorbidas del orden del nanojoule, de niveles muy bajos de luz producidos durante el calentamiento de los dosímetros hasta temperaturas del orden de 300-400 grados Celsius. Durante el calentamiento, además de las señales inducidas por la radiación, con información dosimétrica, se pueden generar otras señales originadas en el propio dosímetro o en el sistema de calentamiento, constituyendo un fondo espurio sobreimpuesto a las señales dosimétricas; tales señales espurias pueden ser de intensidad comparable a las generadas por niveles bajos de radiación y presentan, además, fluctuaciones considerables.

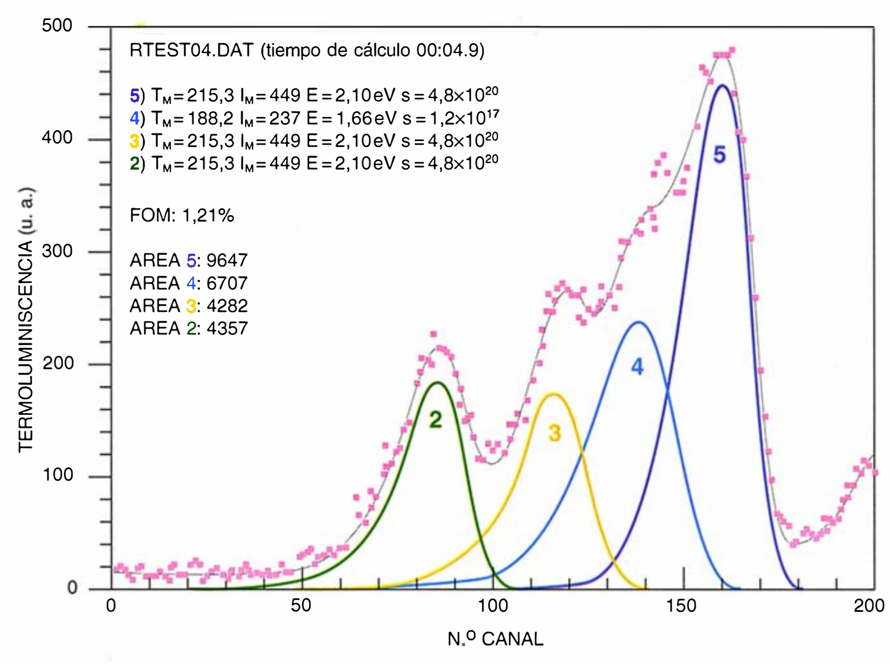
Ese ruido confundente limita la fiabilidad de TLD para la medida de dosis bajas (dosimetría personal y ambiental), cuando se emplean técnicas comunes de evaluación que están basadas en la medida de todas las señales luminiscentes detectadas en un intervalo prefijado de temperaturas durante el calentamiento. La situación se complica con la presencia ocasional de pequeñas contaminaciones que pueden, sin embargo, producir emisiones indeseadas de notable intensidad durante la medida de TL.

Las limitaciones inherentes a los sistemas habituales de medida pueden superarse, en su mayor parte, por el empleo de procedimientos de evaluación basados en el análisis numérico de las curvas de emisión termoluminiscente. Estos métodos de análisis emplean la información que sobre los procesos TL se han obtenido en estudios previos de las propiedades físicas de los materiales empleados en TLD. Gracias a dicha información, podemos identificar y separar, en cada medida, las señales TL inducidas por la radiación de las señales espurias no dosimétricas.

Se han desarrollado modelos de tipo cinético para los procesos TL que, aunque distan de interpretar todas las características de los materiales reales, sí son capaces de predecir la razón de dependencia de las emisiones termoluminiscentes respecto de la temperatura; y proponen expresiones analíticas para la forma de los picos termoluminiscentes en función de unos pocos parámetros físicos, los parámetros de atrapamiento. Estas expresiones permiten analizar la curvas de termoluminiscencia resolviendo los diferentes picos TL y obteniendo valores para los parámetros de atrapamiento de cada uno de ellos. Podemos, además, estimar y separar la contribución de las señales de fondo, pues su dependencia con la temperatura durante el calentamiento es muy diferente de la seguida por los picos TL.

Las expresiones propuestas por los modelos cinéticos para picos TL no son simples; emplean expresiones integrales que no puede evaluarse de manera analítica y obligan a recurrir a métodos numéricos de integración. Esto, unido a la presencia usual de varios picos en las curvas de los materiales utilizados en TLD, determina que tales procedimientos de análisis sean realmente complejos. Hasta fechas recientes se requería el empleo de ordenadores con alta capacidad de cálculo.

En el Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) de Madrid se formó uno de los primeros grupos consagrados al desarrollo de métodos



Análisis completo de la curva de TL del LiF:Mg,Ti. Se resuelven cuatro picos diferentes. Para cada uno de ellos se obtiene el mejor valor de los parámetros de ajuste. T_m e I_m son la temperatura y la intensidad del máximo de cada pico, E *y* s *designan la energía de activación y el factor de frecuencia, parámetros característicos del centro que origina el proceso TL. Para cada pico se calcula también el área, que es el dato directamente empleado para la medida de dosis absorbida. Se indica, asimismo, el factor de mérito del ajuste (FOM). Se han desarrollado otros tipos de programas que realizan un análisis simplificado de las curvas de emisión TL. Los programas simplificados no tratan de resolver los picos individuales, sino que realizan un análisis global de la curvas mediante criterios simples de reconocimiento de forma. Separan TL y fondo, y seleccionan la región de la curva más apropiada. Estos programas simplificados, de ejecución instantánea, son muy adecuados para aplicaciones dosimétricas de tipo rutinario*

numéricos de análisis de las curvas de emisión de materiales con interés en dosimetría de radiaciones. Comenzamos por crear códigos de análisis bastante complejos aprovechando la excelente infraestructura de cálculo de ese centro. Abordamos con ellos el estudio del comportamiento de tales materiales en condiciones prácticas de medida. En el caso del LiF:Mg,Ti, el material más frecuentemente empleado en dosimetría, la resolución de los diferentes picos permitió el estudio de su evolución y sacar a la luz aspectos importantes; por ejemplo, la identificación de los procesos que afectan a la estabilidad de su respuesta a largo plazo, un parámetro esencial en aplicaciones de control radiológico medioambiental. Pronto se apreciaron las ventajas que se podían derivar del empleo de este tipo de métodos de análisis para extraer la información contenida en las curvas TL de aplicaciones dosimétricas. En consecuencia, nos dedicamos a idear programas que operasen en ordenadores tipo PC y pudieran así incorporarse en equipos normales de medida.

Dos factores fueron esenciales para concluir con éxito la tarea: el desarrollo de aproximaciones algebraicas de alta calidad para las expresiones cinéticas de los picos TL y la optimización de los cálculos. Además, fue decisiva la rápida generalización de ordenadores personales cada vez más potentes. El resultado ha sido la consecución de diferentes códigos de cálculo para PC, con diverso grado de complejidad según el tipo de aplicación para la que están diseñados, configurando un sistema experto para la evaluación dosimétrica de las curvas de emisión TL. Los programas más complejos pueden efectuar el tratamiento completo de una curva TL como la del LiF:Mg,Ti en tiempos del orden de 5 segundos en un ordenador tipo 80486. En los últimos años nuestros procedimientos de análisis han sido objeto de exhaustivos tests de contrastación, en particular durante la ejecución del proyecto "Measurement of Environmental Radiation Doses" del programa de Radioprotección de la Unión Europea, que ha venido financiando estas actividades desde 1989 junto a ENRESA y al Consejo de Seguridad Nuclear.

Las ventajas sobre los procedimientos de evaluación tradicionales han quedado patentes. Junto a las derivadas de la separación de las señales TL y las de fondo de cada medida y la posibilidad de seleccionar con precisión tan sólo los picos con buenas características dosimétricas, han aparecido otras ventajas, evidenciadas durante la utilización de los programas de ajuste en condiciones prácticas de medida. Merece destacarse la potencialidad que tienen los valores ajustados para los parámetros de atrapamiento como indicadores de la calidad del procedimiento de medida. Estos parámetros presentan valores bien conocidos y pueden tomarse como referencia para los obtenidos en cualquier medida.

En efecto, si se aprecian discrepancias significativas, fuera del rango de variación normal, habrá que pensar en problemas en la obtención de la medida de termoluminiscencia, tales como calentamientos defectuosos o contaminación de los dosímetros. De forma sistemática, las curvas con parámetros anómalos producen datos dosimétricos discrepantes; la eliminación de las anomalías mejora la incertidumbre estadística de los resultados. Además, la información disponible por el ajuste de las curvas permite identificar las causas de las anomalías y ayuda a evitar su aparición, aumentando la calidad de TL como método dosimétrico.

La posibilidad de emplear los parámetros de atrapamiento obtenidos en una medida como indicadores de la calidad de la misma reviste especial interés en las aplicaciones de dosimetría personal. Dadas las repercusiones profesionales y legales que pueden tener los datos sobre dosis individuales, conviene asegurar que las dosis estimadas provienen de una medida correcta y no de un artefacto del proceso de medida. La posibilidad de emplear los valores de los parámetros de atrapamiento para afianzar la calidad coloca a TLD por encima de cualquier otro método de medida en cuanto a fiabilidad.

En un editorial reciente de *Radiation Protection Dosimetry* se ha destacado el grado de madurez de los métodos de análisis numérico de las curvas TL y las ventajas que su uso supone para la medida de dosis de radiación. Las aportaciones de nuestro grupo se recogen en el editorial, que finaliza animando a los fabricantes de equipos para TLD a incorporar tales métodos a sus productos. El grupo del CIEMAT ha organizado en colaboración con un grupo homólogo de la Universidad Tecnológica de Delft la I Intercomparación Internacional de Métodos de Análisis de Curvas TL (GLOCANIN), en la que han participado dieciocho laboratorios de otros tantos países.

ANTONIO DELGADO
JOSÉ M.ª GÓMEZ ROS
CIEMAT, Madrid

Taller y laboratorio

Robert A. Hiller y Bradley P. Barber

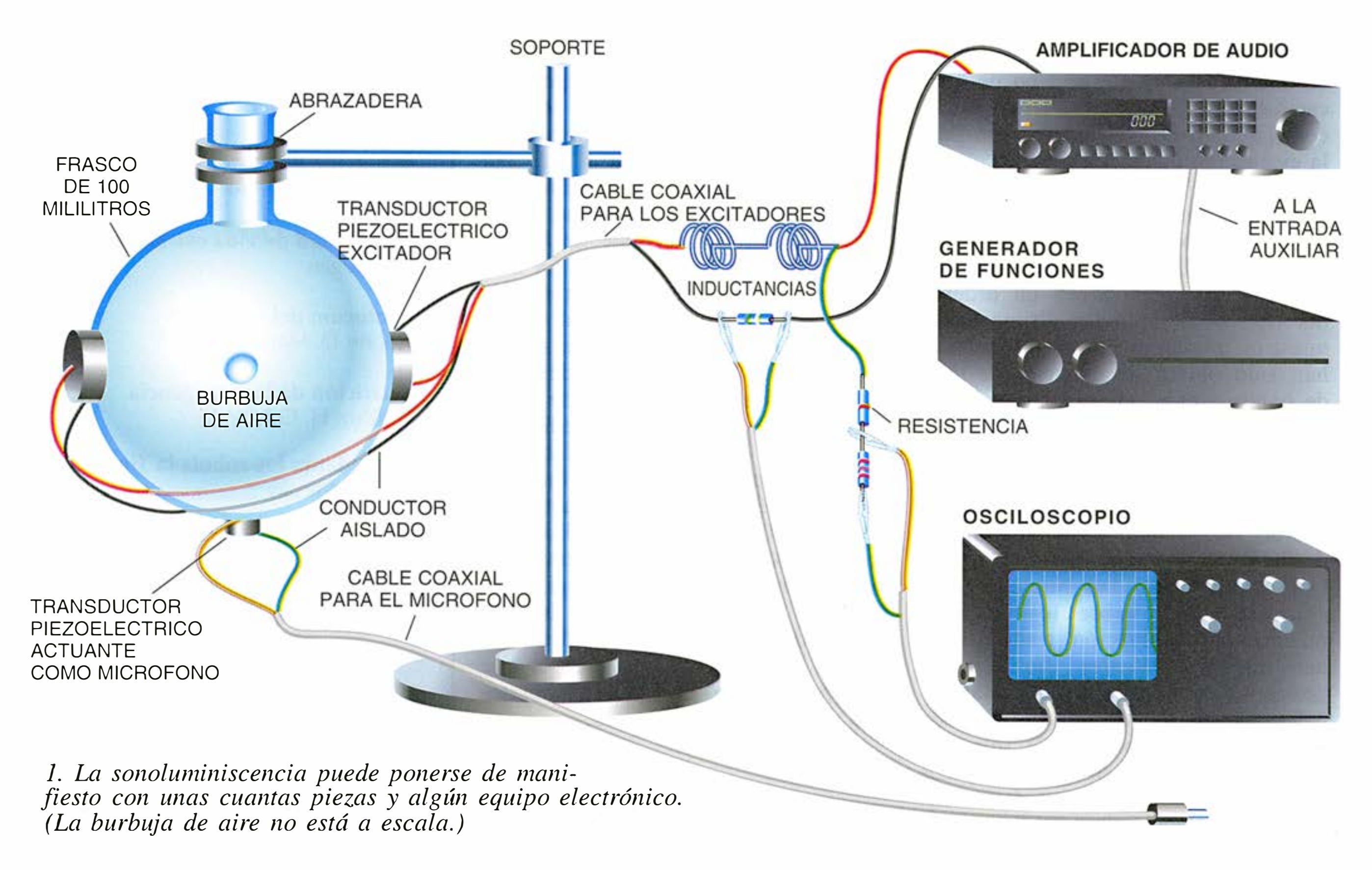
Cómo generar luz con una burbuja de aire

Por mucho que esté dispuesto a pagar, una burbuja de aire luminiscente es algo que el lector no podrá comprar en ningún sitio. Pero con un osciloscopio, un generador de sonido suficientemente preciso, un amplificador estéreo doméstico y un par de miles de pesetas, podrá convertir el sonido en luz merced a un proceso llamado sonoluminiscencia (véase el artículo de Seth J. Putterman que aparece en este mismo número). El montaje es bastante sencillo. Un frasco o matraz esférico de vidrio lleno de agua nos servirá de resonador: cavidad donde se creará el sonido que atrapará y lanzará cada burbuja. Al frasco se adhieren unos pequeños altavoces, los transductores piezoeléctricos, que están alimentados por un generador y un amplificador de audio. En el agua se introducen burbujas de aire que se fusionan en el centro del recipiente y producen una luz pálida, visible a ojo desnudo en una habitación a oscuras.

Hay que poner en vibración el matraz con agua a su frecuencia de resonancia, o sea, a la frecuencia sonora a la que responde con mayor intensidad. Esa frecuencia de resonancia es igual a la velocidad del sonido en el agua (1500 metros por segundo) dividida por el diámetro de la esfera. El vidrio hará que la frecuencia de resonancia real sea del orden del 10 por ciento más alta. Nosotros empleamos un frasco de ebullición esférico de pyrex de 100 milímetros con un diámetro de 6,5 centímetros. Lleno de agua, resonó a unos 25 kilohertz. Los mejores resultados se consiguen con un frasco de cuello estrecho. La grasa y el aceite pueden interferir con las burbujas, por lo que el vidrio debe lavarse a conciencia con jabón y enjuagarse bien.

Necesitará tres transductores piezoeléctricos; dos para crear la onda acústica y uno que actúe como micrófono y capte el sonido de las burbujas al reventar. Como transductores excitadores, empleamos discos de 15 milímetros de diámetro y seis milímetros de espesor. El micrófono tenía tres milímetros de diámetro por uno de espesor.

A las cerámicas piezoeléctricas conecte alambres finos (galga 36) para que hagan de conductores (el alambre delgado minimiza las pérdidas de sonido). Hay que estañosoldar el alambre a los electrodos de plata de la cerámica. Para ello, elimine primero la capa de óxido de los transductores frotándolos levemente con una goma de borrar lápiz. Actúe enseguida con un hierro de soldar frío depositando una gota de suelda sobre las caras plateadas de cada transductor. Quite seis milímetros de aislante



1. La sonoluminiscencia puede ponerse de manifiesto con unas cuantas piezas y algún equipo electrónico. (La burbuja de aire no está a escala.)

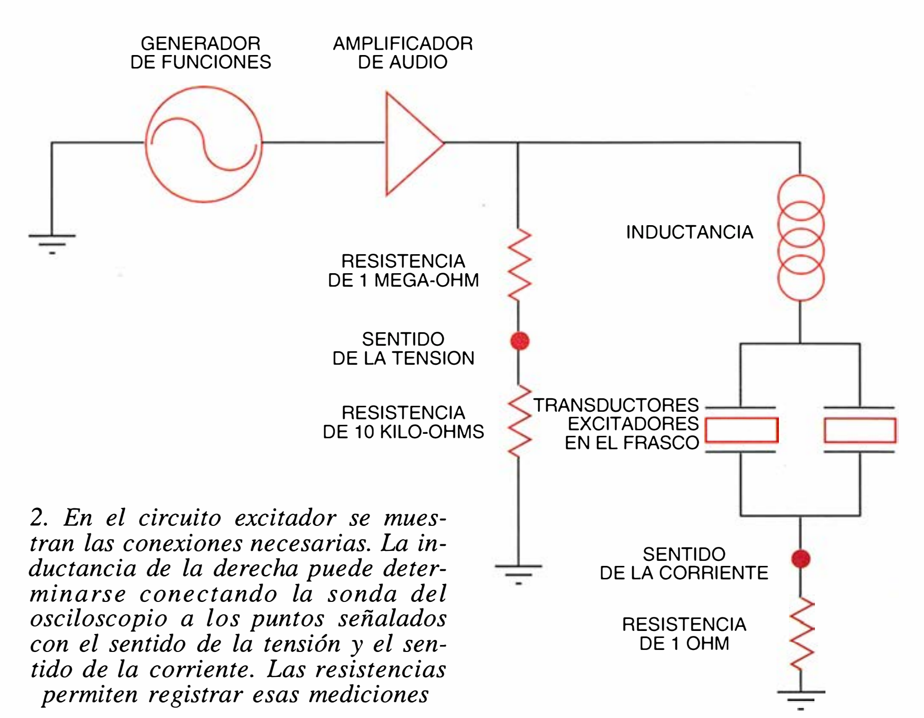
del extremo del alambre conductor. Estañe el conductor de cobre (es decir, funda un poco de suelda sobre él) y, tras calentar brevemente la soldadura, colóquelo sobre la gota de ésta. Una medida prudente es fijar tres conductores a cada disco, espaciados formando triángulo; nos aseguramos así de que cada disco descanse uniformemente sobre la superficie curva del frasco. Además, los hilos sobrantes pueden servirnos de repuesto en caso de que el primero se rompa.

Fije con epoxia los transductores al frasco. Recomendamos la epoxia rápida, de secado en cinco minutos, ya que permite desprender los transductores del vidrio sin provocar roturas. Emplee sólo la epoxia necesaria para rellenar el espacio entre los transductores y el frasco. Por simetría, coloque los dos transductores excitadores en costados opuestos sobre el plano ecuatorial del matraz y el micrófono en el fondo. Los transductores están polarizados y, por tanto, una de sus caras estará identificada con un signo más o menos. Asegúrese de que los dos excitadores están sujetos y conectados al frasco del mismo modo, o sea, ambos deben tener el signo más enfrentado al recipiente, o viceversa.

Suelde un conductor corto a la cara externa de cada transductor. Conéctelos entonces en paralelo para que ambos se dilaten y contraigan a la vez. Empalme los cables a cables coaxiales, con lo cual reducirá la diafonía entre los componentes. En particular, los cables del micrófono deben ser cortos, con una longitud no superior a 10 milímetros antes del empalme con los cables coaxiales. Los conductores deben poseer longitud suficiente para que no sufran tracción al estar conectados. Suspenda el frasco bien embridándolo por el cuello a un soporte de laboratorio, o colgándolo con alambres sujetos al cuello. Los cables sujételos todos al soporte para evitar que se rompan.

Desde el punto de vista eléctrico los altavoces piezoeléctricos actúan como condensadores. Para excitarlos

ROBERT A. HILLER y BRADLEY P. BARBER estudian la sonoluminiscencia en el laboratorio de Seth J. Putterman de la Universidad de California en Los Angeles. Hiller prepara su tesis doctoral sobre el espectro sonoluminiscente. Barber descubrió que la luz procedente de las burbujas emerge en intervalos de picosegundos, sincronizados con el campo sonoro.



2. En el circuito excitador se muestran las conexiones necesarias. La inductancia de la derecha puede determinarse conectando la sonda del osciloscopio a los puntos señalados con el sentido de la tensión y el sentido de la corriente. Las resistencias permiten registrar esas mediciones

con un amplificador de audio (una fuente de baja tensión y baja impedancia), hay que conectarlos en serie con una bobina de inductancia. Esta debe elegirse de modo que resuene eléctricamente con la capacidad piezoeléctrica a los 25 kilohertz aproximadamente, es decir, más o menos a la misma frecuencia a la que se presenta la resonancia acústica. Los excitadores que aquí se describen poseen una capacidad de unos dos nanofarads, por lo que la inductancia requerida es de unos 20 milihenrys. Un buen truco para ajustar la inductancia consiste en emplear una o dos bobinas en serie. Variando la distancia entre éstas, podremos aumentar o disminuir la inductancia total hasta en un 50 por ciento. Con dos bobinas de 10 milihenrys separadas unos cinco centímetros conseguiremos un buen punto de partida.

Para determinar la inductancia correcta, tendrá que medir la tensión y la corriente del circuito (*véase la figura* 2). Utilice un osciloscopio de dos canales para sacar por pantalla ambas cantidades a la vez. Póngalas en fase (sus curvas osciloscópicas deberán estar alineadas) ajustando la inductancia. Aunque la corriente procedente de un sistema estéreo doméstico es baja, la tensión puede producir una pequeña sacudida; asegúrese, pues, de que todos los empalmes expuestos y cables externos estén aislados, recubiertos de cinta aislante y pintados con esmalte de uñas. Es normal que el transductor micrófono produzca del orden de un volt; su salida puede enviarse directamente a la entrada de alta impedancia del osciloscopio.

Una burbuja sonoluminiscente puede crearse sólo en un agua de la que se haya extraído el aire disuelto naturalmente. Un procedimiento simple para desgasear agua es hervirla. Emplee para ello un frasco Erlenmeyer de pyrex de una capacidad de 500 a 1000 mililitros y provisto de tapón estanco. A través de éste encaje un tubo hueco de unos seis milímetros de diámetro y unos 10 centímetros de largo, al que habrá fijado un trozo corto de tubo de caucho, cuya misión estriba en facilitar la descarga del vapor y limitar la difusión de aire de retorno al frasco.

Llene con agua destilada el recipiente hasta la mitad. Caliente ésta lentamente y manténgala en ebullición tumultuosa durante 15 minutos. Retire entonces el frasco del calor, ponga una pinza al tubo de caucho para que no entre aire y deje que el frasco se enfríe (con refrigeración se acelerará el proceso). Ya enfriado, en el matraz habrá un fuerte vacío y el agua estará muy bien desgaseada. Manténgala sellada hasta que vaya a utilizarla, pues el líquido reabsorberá aire en dos o tres horas una vez que se abra el recipiente.

Con cuidado vierta el agua desgaseada en el frasco resonador, haciendo que corra pared abajo. De ese modo, en el agua se introducirá un poco de aire, pero sólo aproximadamente la quinta parte en concentración respecto a la concentración atmosférica, que es la correcta para la sonoluminiscencia. El agua se rega-

seará lentamente, pero seguirá utilizable durante algunas horas. Llene el recipiente con agua hasta el nivel del fondo del cuello, con lo que la masa de agua será aproximadamente esférica.

Para un frasco esférico de 100 mililitros, sintonice el generador de audio a la frecuencia de resonancia de 25 kilohertz. Ajuste el osciloscopio para que muestre simultáneamente la tensión de salida del amplificador y la corriente que atraviesa los excitadores. Actúe en el mando de volumen de modo que la tensión de salida del amplificador dé una lectura de un volt entre picos y ajuste la inductancia para que la corriente esté en fase con la tensión. Controle la corriente, ya que podría exceder del límite correspondiente a la bobina y hacer que ésta se recaliente. Asimismo, compruebe periódicamente que la frecuencia esté ajustada al pico de resonancia, puesto que la misma podría variar con el nivel y la temperatura del agua.

Entonces, por la pantalla del osciloscopio saque la salida del micrófono piezoeléctrico. Conforme varíe la frecuencia del generador, observará un pico en la señal del micrófono, de una anchura de uno a dos kilohertz. Ese pico corresponde a la resonancia eléctrica entre la bobina y la capacidad de los excitadores. La resonancia acústica se muestra en forma de pico mucho más agudo en la señal del micrófono, de una anchura menor que 100 hertz, y como una leve inflexión en la corriente de excitación.

Una forma fácil de hallar la resonancia por primera vez consiste en examinar las burbujas del frasco o matraz. Como las burbujas pequeñas difunden la luz con mayor eficiencia hacia adelante, para ver mejor ponga una lámpara potente detrás del frasco. Un fondo oscuro mejorará la visibilidad. Con un cuentagotas, extraiga un poco de agua. A la vez que mira hacia el frasco iluminado por detrás, oprima la superficie del cuentagotas lo suficiente para crear de 10 a 30 burbujas. Ajuste el generador y determine la frecuencia con que las burbujas progresan hacia el centro y acaban fundiéndose en una sola. Cuando todo esté perfectamente afinado, se creará una burbuja sin más que hurgar un poco la superficie con un alambre.

Cuando tenga una burbuja en el centro del frasco, aumente poco a poco la amplitud. La burbuja primero se estabilizará y luego "bailará" en torno a dos o tres milímetros. Una amplitud aún mayor hará que la burbuja vuelva a estabilizarse y se contraiga, haciéndose casi invisible antes de crecer otra vez. Por encima de cierta intensidad sonora, la burbuja se desintegrará. La emisión luminosa óptima se consigue por debajo de este umbral de amplitud.

En la traza osciloscópica procedente del micrófono deben verse pequeñas ondulaciones. Esta señal corresponde a un sonido de alta frecuencia que emite cada burbuja al colapsar en cada ciclo. Seguirá mejor el estado de la burbuja si observa esas ondulaciones en vez de contemplar aquélla. Para atenuar el sonido excitador, puede emplearse un filtro eléctrico de paso alto, que hará más visibles las ondulaciones en la pantalla del osciloscopio.

Si quiere observar con nitidez la luminiscencia emitida por una burbuja, apague las luces de la habitación y espere a que la vista se acostumbre a la oscuridad. Verá entonces una mancha azul en las cercanías del centro del frasco, algo así como una estrella azul en el firmamento nocturno. La burbuja puede hacerse más brillante y más estable ajustando finamente la frecuencia y la amplitud del sonido excitador. Si la burbuja luminiscente se mueve dentro del frasco o su brillo varía a lo largo de algunos segundos, es que el agua contiene un exceso de aire. Salga al paso de la dificultad cambiando el agua por otra recién desgaseada.

Si las burbujas no se mueven en absoluto, o si se mueven hacia el costado del frasco, significa probablemente que no ha sintonizado con la frecuencia correcta. Ajuste entonces la frecuencia del generador a 24 o 26 kilohertz, reajuste la inductancia de modo que la corriente y la tensión estén en fase e inténtelo de nuevo. Cambiando el nivel del agua y la forma en que el frasco esté suspendido puede que se mejore la acústica. Como último recurso, con mucho cuidado desprenda los transductores con una cuchilla de afeitar y pruebe con otro frasco.

Una vez que haya conseguido generar sonoluminiscencia, puede dedicarse a investigar en torno a otros aspectos del fenómeno. Por ejemplo, ¿cómo afectan a la emisión luminosa los campos eléctricos y magnéticos? ¿Cómo varía el comportamiento de las burbujas en función de las distintas sustancias que puedan disolverse en el agua? ¿Qué nuevos caminos hay para investigar la transformación del sonido en luz? Con nuestro dispositivo casero, se halla en disposición de investigar en los límites de la ciencia.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

El crepúsculo de los antidioses en el juego del solitario ante un tablero infinito

Abel Hisco, aprendiz de Roque Cascarrocas, regresaba de la obra de la plaza del mercado de Hipervilla, en la cual había reemplazado los adoquines por losetas en forma de dominó.

"Veo que, por fin, te has decidido a hacer acto de presencia. A ver si te enteras de que no te pago para que te tomes unas largas vacaciones."

"Roque, tampoco me paga usted para que me tome unas cortas. La verdad es que no me paga absolutamente nada."

"Se debe al reglamento interno de la empresa", respondióle con desdén el presidente de CODOP (Concesionaria de Obeliscos Públicos). "Cito: 'Cuando el negocio va flojo, de pagar, ni hablar'."

El patio estaba lleno de rocas, piedras, losas, pizarras, bloques, guijarros, obeliscos y cantos rodados inservibles. "Siempre el mismo cuento", le replicó Abel. "Sin embargo, la recesión ha terminado..."

"No ha terminado; sólo ha dejado de empeorar. Nos hallamos a la espera de una reactivación del consumo, que no debería basarse en importaciones, sino en estimular, como tanto se desea, a nuestro sector productivo."

"¿De qué sector productivo me habla?"

"Buena observación."

"He oído hablar de una aceleración súbita en la producción de dientes para gallinas."

"Así es. Y los derviches, ¿han quedado satisfechos con nuestro trabajo?"

"Roque, ¿ha visto alguna vez a un derviche satisfecho?"

"Lo que quiero saber es si han pagado la cuenta."

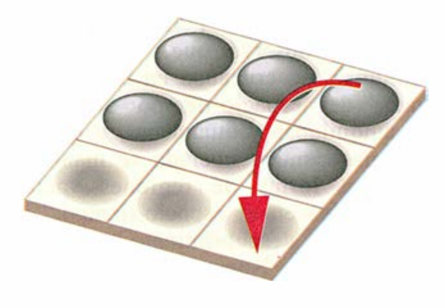
"Después de haberles amenazado con la peste bubónica y supurante por toda la eternidad y el más allá, se decidieron."

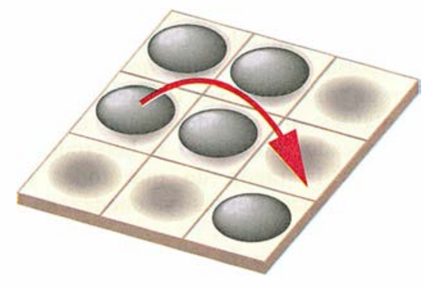
"Increíble. Una celeridad sorprendente. Me estaba temiendo que te vieras obligado a recurrir a la suerte de la vaca loca."

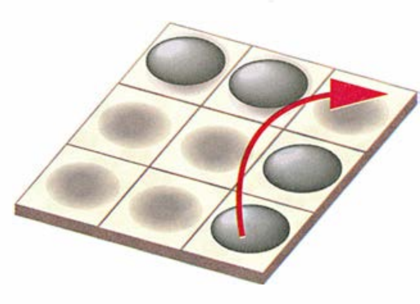
"¡Yup! Me parece que la calidad de nuestra pavimentación les ha disuadido de regatear."

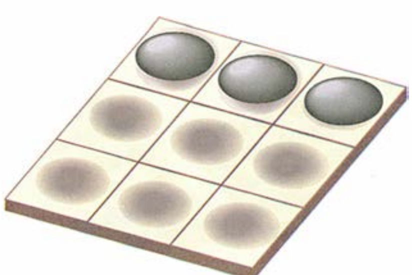
"...Pudiera ser."

Roque acabó por fijarse en una bolsa que Abel arrastraba en pos de sí.









1. Esta sucesión de movimientos, llamada "aniquilación triádica", elimina una hilera de tres antidioses

"¿Qué llevas ahí dentro?"

Sin esperar la respuesta, Roque le dio un tirón seco al cordón y volcó una parte del contenido.

"¿Piedras? Por el Gran Fangoso, Abel, ¿no te parece que la CODOP tiene ya suficientes piedras entre manos sin necesidad de importarlas de Hipervilla? ¡Te bastas tú solo para hundir la empresa! En fin, la hubieras hundido de haber llegado a haberla", añadió Roque de mala gana.

"Es un juego", respondió Abel. "Es un regalo que he traído para Atchismira."

Se sonrojó.

"Y sólo cuesta quinientos óbolos de cobre."

"Y... oye... ¿cuánto has conseguido de los derviches, Abel?"

"Bueno... quinientos óbolos de cobre, pero este juego bien los merece. Apostaría a que Atchís no ha visto jamás nada parecido."

Cascarrocas miró la bolsa.

"¿Tanto trabajo para contentarnos con una bolsa llena de piedras?"

"He obtenido también la exclusiva de los derechos de comercialización del *Juego de los antidioses* para todo el territorio de los grandes pantanos."

"¿Del juego de qué...?"

"De los antidioses. De esas piedras, las de la bolsa."

Roque, furioso, arrojó con todas sus ganas el buril a través del patio.

"¡Eres un imbécil!"

"Puede ser, pero piense que un juego de antidioses completo cuesta quinientos óbolos de cobre y que está totalmente constituido por piedras. Por piedras de cualquier tipo."

"¡Repíteme eso!"

Abel lo hizo.

"Tenemos bastantes excedentes de piedras", pensó Roque en voz alta al tiempo que señalaba los montones que les rodeaban. Pasó afectuosamente el brazo por los hombros de Abel.

"¿En qué consiste el juego?"

"Ahora iba a explicárselo a Atchismira."

"¡Te acompaño!"

Jefe y empleado se pusieron en camino hacia la Gándara del Gato Muerto.

Cuando llegaron, Atchismira estaba pescando anguilas, que enseguida iba a poner a marinar, en previsión de un invierno duro. Abel le acercó tímidamente su regalo. Atchís desanudó el cordón de la bolsa.

"¡Oh, Abel, un juego de antidioses!" Abel parecía desconsolado.

"¡Hacía muchísimo tiempo que soñaba con uno! ¡Qué intuición más genial! Son imposibles de encontrar en este agujero, ¿sabes? Alguien debería comercializarlos... Se venderían como... como... anguilas en escabeche." La joven le ayudó a desempaquetar el juego, que se componía de una gran placa cuadriculada y de millares de piedrecitas negras, lisas y circulares. Depositaron la placa en el suelo y comenzaron a colocar las piedrecitas, una en cada casilla.

"Has perdido una", observó Roque.

"No; tiene que haber una casilla vacía", replicó Abel.

"¿Y eso por qué?"

"Porque en el juego de los antidioses las piedras se desplazan saltando sobre una piedra adyacente para llegar a una casilla vacía, lo que permite eliminar la piedra sobre la que hemos saltado. Sin una casilla vacía inicial, el juego no podría arrancar."

"¡Ah!"

"'Adyacente' significa 'vecina inmediata sobre una fila o una columna', lo cual excluye las diagonales."

"Naturalmente. ¿Y cuál es el propósito del juego?"

"Eliminar el máximo posible de piedras", le respondió Abel.

"En realidad", le interrumpió Atchismira, "el objetivo es mucho más importante. De creer a las antiguas leyendas Nomes, el juego de los antidioses debe jugarse sobre un damero infinito que presenta, al empezar, una única casilla vacía; el jugador tiene que eliminar todas las piedras. Realizando, claro está, una sucesión infinita de movimientos. Se trata de un antiguo rompecabezas numerosófico. El juego de los antidioses es un simulacro de la Anticreación de los antidioses por Antibang-la-Plaga."

"¿Y eso qué es?"

"Los Nomes profesan que originalmente cada punto del universo estaba ocupado por antidioses, que impedían la existencia del espacio, el tiempo y la materia. Después, Antibang-la-Plaga expulsó a los antidioses más allá de las más lejanas fronteras del infinito, dejando al universo lugar para existir. Y hubo universo. Antibang observó que, cuando dos antidioses se cruzaban en una región vacía del espacio-tiempo ordinario, se aniquilaban mutuamente, y que la energía cósmica liberada se manifestaba en forma de regiones vacías adicionales en el espacio-tiempo."

"Extraño descubrimiento."

"En efecto. Nuestra logia ha denominado a esta teoría 'Modelo estándar de prohibición renormalizable en mecánica contable'. Como es natural, la teoría da por supuesto que todos los antidioses tienen iguales números contables: magnitudes como deshonra, pecado, nocividad o heterodoxia. Esa es la razón de que todas las piedras sean negras y obedezcan a las mismas reglas."

"Eso salta a la vista", opinó Roque Cascarrocas.

"¿Y es posible?", preguntó Abel.

"¿El qué?", rezongó Roque.

"Eliminar a todos los antidioses."

"¡Ah, ya! Eliminarlos a todos... Vamos a ver... ¿Atchismira?"

"Es posible, sí. La clave del problema estriba en la regla de aniquilación triádica."

"¿La regla de qué?"

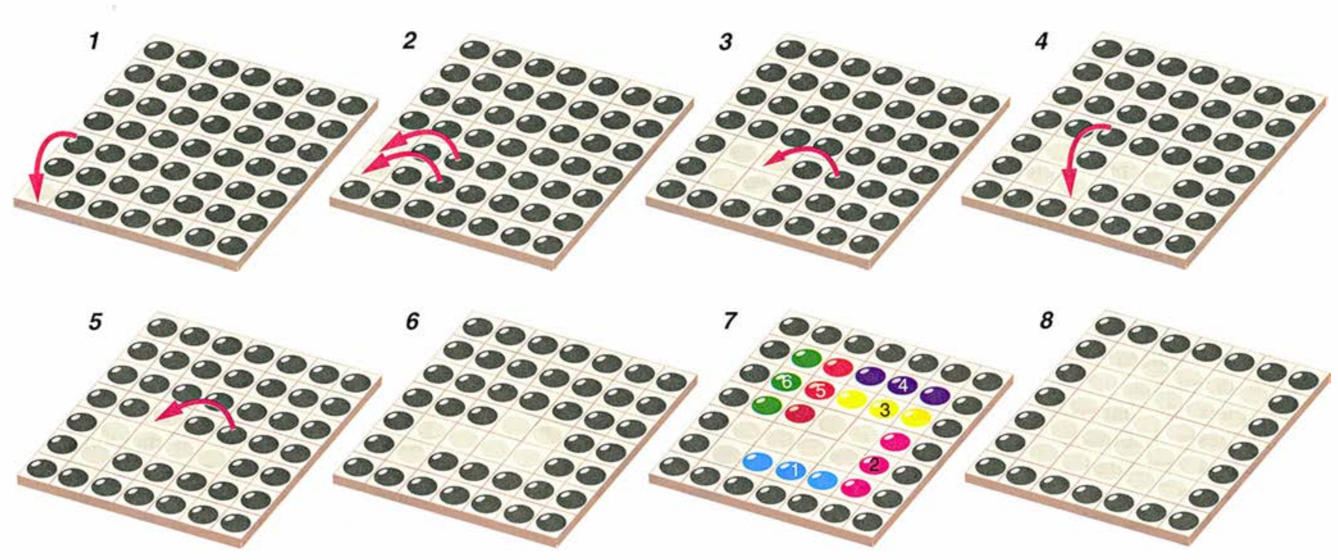
"Cuando una línea de tres antidioses está situada debajo de otra línea de tres antidioses y hay una casilla vacía adyacente a una de sus extremidades, los tres antidioses de la primera línea pueden ser eliminados [*véase la figura 1*]. Esta propiedad es útil, porque permite, una vez creada una brecha en la red de los antidioses, irlos eliminando de tres en tres; en ello reside el origen de la denominación 'aniquilación triádica'.

"Esta regla permite crear una brecha cuadrada de cinco cuadrículas de lado: bastan para ello algunos movimientos sencillos seguidos de seis aniquilaciones triádicas [*véase la figura 2*]. A continuación, podemos agrandar el agujero mediante movimientos triádicos sobre los bordes. Hay varias maneras de hacerlo, pero una de ellas consiste en agrandar sucesivamente la brecha hasta las dimensiones 7×7, 11×11, 13×13, 17×17, etc., aumentando alternativamente los lados en dos y cuatro casillas..."

Atchismira les mostró cómo proceder [*véase la figura 3*].

"¿A qué se debe esta alternancia?"

"Porque las series de movimientos son diferentes según que el lado del agujero sea un múltiplo de tres más o menos una unidad, para poder progresar siempre por tríadas. Las dos situaciones se van alternando: 5 es igual a un múltiplo de tres menos



2. Creación de un hueco vacío cuadrado de 5 × 5. Las seis aniquilaciones triádicas se efectúan en el orden azul, rosa, amarillo, violeta, rojo y, por último, verde

una unidad; 7, una unidad más; 11, una unidad menos; 13, una unidad más, y así sucesivamente."

"Entendido."

"Como es obvio, resulta imposible construir un damero infinito", señaló Atchismira.

"¿Un damero?"

"Sí, este reticulado de casillas cuadradas."

"Pero esto es una losa, no un damero", objetó Roque.

"Los numerósofos hablan de reticulados..."

"¡Por la quinta axila del Gran Fangoso! Sé reconocer una losa cuando la veo", explotó Roque, rojo de indignación. "Los dameros se hacen de madera, no de piedra. Incluso soy capaz de distinguir una losa de un dolmen, a pesar de estar llegando al final de mi carrera!"

"De acuerdo, mas aunque sea por galantería sigamos diciendo damero", intervino Abel diplomáticamente. "Sé muy bien que todavía no estamos en la Edad del Hierro, pero sabemos vivir. Y no se olvide de echar tres óbolos de cobre en el árbol de las imprecaciones cuando regresemos."

"¡Ah, sí! ¡Lo siento!"

"Se han encontrado otras muchas cosas en las viejas leyendas Nomes", prosiguió Atchismira. "Un grupo de herejes afirma que Antibang-la-Plaga se vio obligado a entablar una lucha cósmica con el Gran Cric y no consiguió limpiar más que una mitad del universo. Nosotros creemos, equivocadamente, que llegó a despejarlo del todo, porque la parte donde nosotros vivimos está rodeada de una inmensa región de espacio-tiempo ordinario; pero muy lejos, tan distante que no podemos verla, se alza la Gran Muralla, límite del universo normal. A partir de ella comienza un semiplano semiinfinito de antidioses, que acechan con la esperanza de volver a recubrir toda la extensión de su antiguo dominio."

"¿A qué distancia?"

"¡Uuf! A una distancia considerable, tal vez a millares de años-muleros."

"¿Qué es un año mulero?"

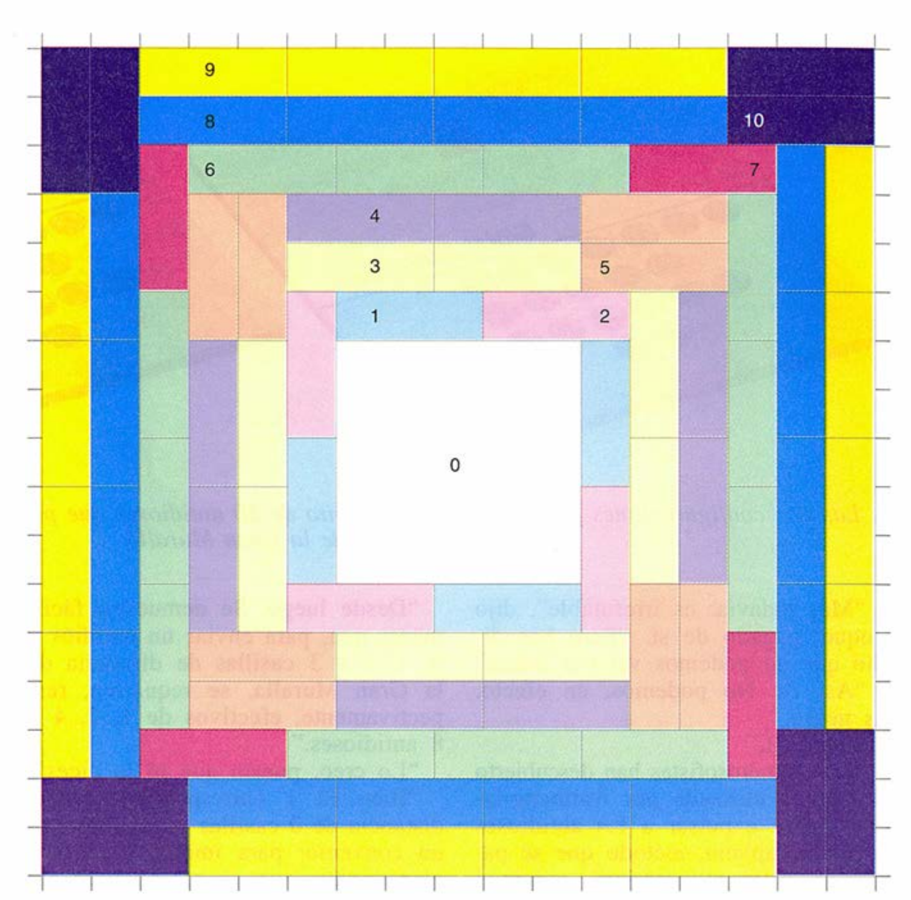
"La distancia que puede recorrer una mula en un año."

Permanecieron silenciosos, estupefactos por esta evocación de la inmensidad cósmica, hasta que Abel preguntó: "¿Con zanahorias o sin ellas?"

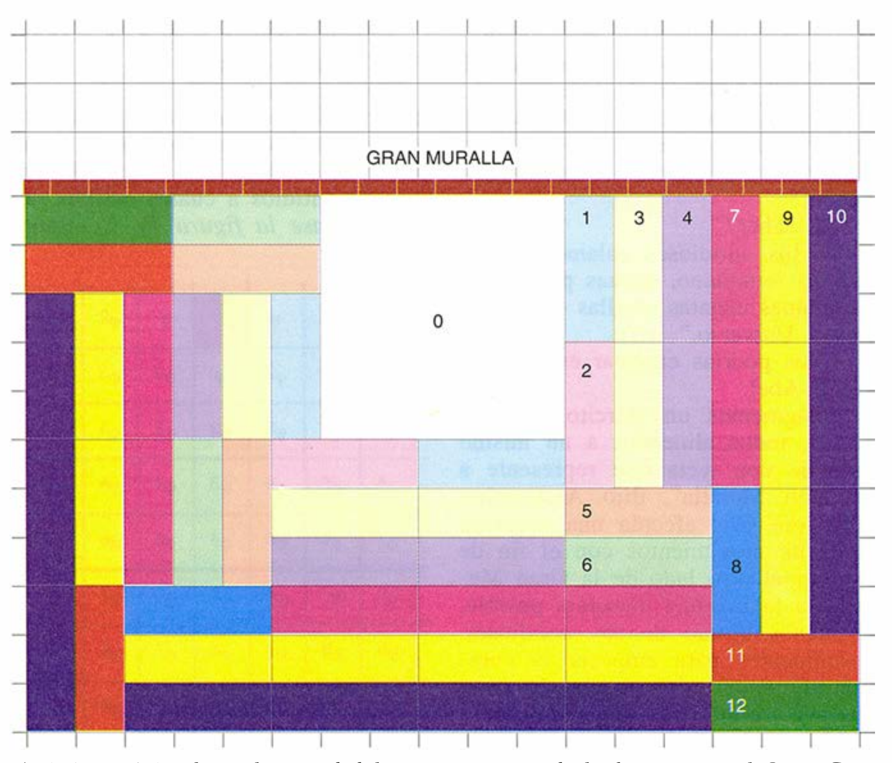
La cuestión era tan trivial que Atchismira la desdeñó, prosiguiendo:

"Y por esa razón el cielo es negro. Las estrellas que vemos se encuentran todas de nuestro lado de la Gran Muralla. Por detrás de ellas se extiende la oscuridad infinita del muro."

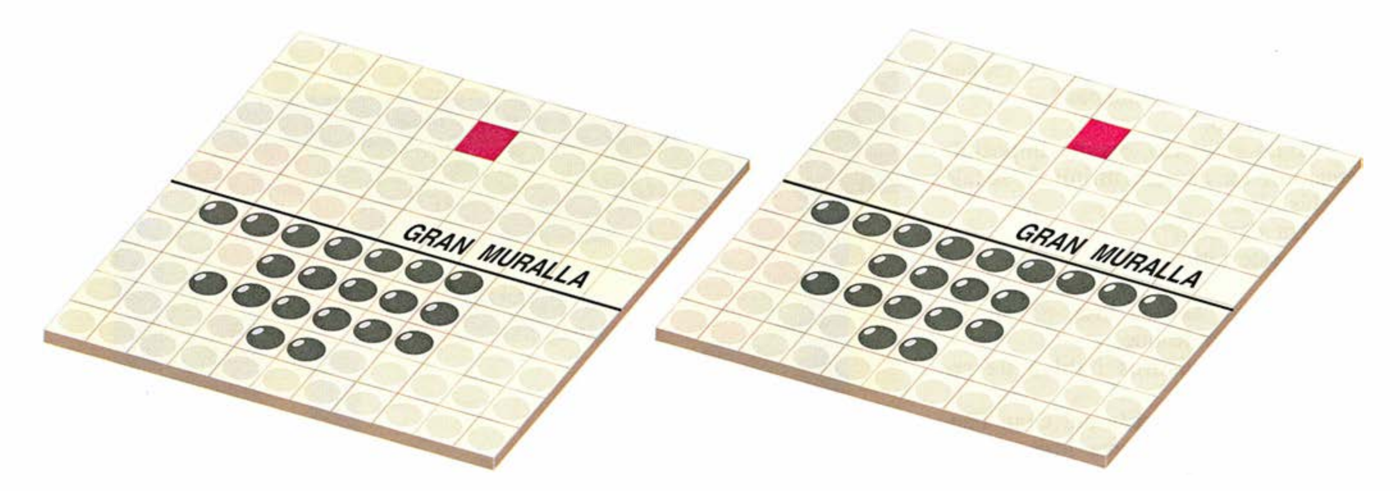
"Eso parece lógico", convino Abel.



3. Así vació Antibang el universo entero. Se va agrandando sucesivamente una brecha cuadrada mediante aniquilaciones triádicas. Los números indican el orden de los movimientos; antes de pasar al número siguiente, se eliminan de la frontera de cada cuadrado los tríos de antidioses que tienen el mismo color



4. Así vació Antibang la mitad del universo antes de luchar contra el Gran Cric. Lo mismo que en la figura 3, los números indican el orden de las aniquilaciones triádicas. El semiplano infinito de antidioses, representado por las casillas blancas, está limitado por la Gran Muralla



5. Las dos configuraciones posibles para un ejército de 20 antidioses que pueden enviar un batidor a cuatro casillas de la Gran Muralla

"Más todavía: es irrefutable", dijo Roque, pagado de sí. "Pero has dicho que no podemos ver ese muro."

"Así es. No podemos, en efecto. Es negro."

"Oh... Sí."

"Los numerosofistas han descubierto el método utilizado por Antibang-la-Plaga para expulsar a los antidioses de un semiplano, método que se parece bastante al anterior", continuó explicando Atchís. "Lo mismo que antes, se empieza despejando un cuadrado de 5 × 5, y después se agranda el hueco. Pero esta vez se utiliza otra secuencia de aniquilaciones triádicas [*véase la figura 4*]."

"¡Y pensar que todos esos antidioses están a las puertas de nuestro universo!", intervino Roque.

"No corremos gran peligro. Un descubrimiento numerosófico de gran alcance cosmológico nos ha tranquilizado."

"¿A saber?"

"Si los antidioses solamente ocupan un semiplano, apenas podrán invadir unas cuantas casillas en el resto del Universo."

"¿Nos podrías explicar eso?", preguntó Abel.

"Imaginemos un ejército de antidioses, todos alineados a un mismo lado de una recta que represente a la Gran Muralla", dijo Atchismira. "El Gran Cric efectúa una sucesión finita de movimientos con el fin de expedir al otro lado de la Gran Muralla, a la máxima distancia posible, al menos a uno de sus antidioses. Examinemos para empezar la cuestión siguiente:. ¿de qué tamaño tiene que ser ese ejército para que el Gran Cric logre enviar a un antidiós a 0, 1, 2, 3, 4 o 5 casillas del otro lado de la Gran Muralla?"

"¿Siempre con las mismas reglas de desplazamiento?"

"Desde luego. Se demuestra fácilmente que, para enviar un antidiós a 0, 1, 2 o 3 casillas de distancia de la Gran Muralla, se requieren, respectivamente, efectivos de 1, 2, 4 y 8 antidioses."

"Lo creo, puesto que tú lo dices."

"Bien. El '1' correspondiente a una distancia de 0 casillas no es más que un convenio: para imaginar un desplazamiento, aunque sea nulo, es necesario imaginar la existencia de un antidiós. Tratemos ahora de enviar un antidiós a cuatro casillas de distancia de la Gran Muralla. ¿De qué tamaño tendría que ser el ejército del Gran Cric?"

"Vamos a ver...: 1, 2, 4, 8... Serán 16. ¿Supongo bien?"

"Pues no, hacen falta 20. Más exactamente, si descontamos las configuraciones deducidas a partir de otras por simetría, hay dos formas de enviar un antidiós a cuatro casillas del muro [*véase la figura 5*]. Continuemos: las primeras soluciones son 1, 2, 4, 8 y 20; ¿de qué tamaño ha de ser el ejército capaz de enviar un batidor a una distancia de cinco casillas?"

"¡Sólo Antibang lo sabe!"

"No, también lo sé yo. La respuesta es: infinito. En realidad, ni siquiera un ejército infinito podría conseguirlo. Es imposible enviar un antidiós a una distancia de cinco casillas del muro cuando el ejército, sea finito o infinito, está enteramente confinado a un lado del muro."

"Hum... El caso infinito, ¿no se deduce del caso finito?"

"¡Acabaré por hacer de ti un numerosofista, Abel! Explícate más."

"Si un antidiós pudiera alejarse cinco casillas, no lo lograría sino tras una sucesión finita de movimientos. Si ninguna sucesión finita pudiera alejarle más de cuatro casillas, una sucesión infinita de movimientos no le permitiría alejarse más que el límite de una sucesión de números comprendidos entre 0 y 4, y este límite sería necesariamente menor o igual que 4."

"Exacto. ¿Y entonces qué?"

"Si realizamos una sucesión finita de movimientos, sólo interviene una parte finita del ejército. Lo cual hace indiferente que al partir se tenga un ejército finito o infinito."

"Excelente. ¿Lo has comprendido, Roque?"

"No, pero no os rompáis la cabeza; estoy dispuesto a creer lo que decís." Roque dudaba. "Me pregunto, sin embargo, qué es lo que os hace confiar tanto en la imposibilidad de que cualquier ejército llegue a alcanzar una distancia de cinco casillas."

Atchismira se sonrió.

"La función Pagoda."

"Una observación como ésa bien merece un óbolo de cobre", rezongó

φ^3	φ^2	φ	1	φ	φ^2	φ^3
φ^4	φ^3	φ^2	φ	φ^2	φ^3	φ^4
φ^5	φ^4	φ^3	φ^2	φ^3	φ^4	φ^5
φ^6	φ^5	φ^4	φ^3	φ^4	φ^5	φ^6
φ^7	φ^6	φ^5	φ^4	φ^5	φ^6	φ^7
φ^8	φ^7	φ^6	φ^5	φ^6	φ^7	φ^8
φ^9	φ^8	φ^7	φ^6	φ^7	φ^8	φ^9
φ^{10}	φ^9	φ^8	φ^7	φ^8	φ^9	φ^{10}

6. Esta función Pagoda demuestra que ningún ejército finito puede enviar a uno de sus miembros a una distancia de cinco casillas de la Gran Muralla

Roque, señalando al árbol de las imprecaciones.

"No, no es un juramento, sino una idea que permite poner a prueba las predicciones concernientes a este juego. Consiste en asignar un valor numérico a cada casilla del damero. El valor de un grupo de antidioses es entonces igual a la suma de los valores de las casillas que ocupan. La atribución de valores a las casillas del damero es una función Pagoda si cada movimiento lícito hace que el valor del grupo de antidioses permanezca igual o menor que el valor de partida."

"¿Cómo es eso?"

"Tomemos un ejemplo. Imaginemos un damero finito, cruciforme, en el que todas las casillas están ocupadas, a excepción de cinco casillas centrales que también forman una cruz [*véase la figura 6*]. ¿Será posible encontrar una secuencia de movimientos que invierta esta configuración, dejando piedras tan sólo en las cinco casillas que inicialmente estaban vacías?"

Abel y Roque estuvieron intentándolo mucho tiempo, sin éxito.

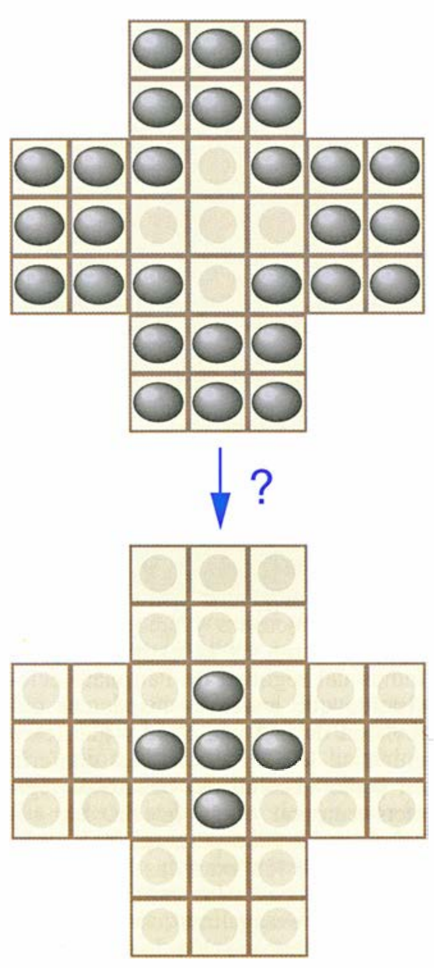
"No sigáis buscando", se burló Atchismira. "La tarea es imposible. Para demostrarlo, consideremos una función Pagoda de un tal damero [*véase la figura 7*]: ningún movimiento permite incrementar su valor total. Basta observar que, para tres casillas alineadas, de valores respectivos a, b, c, hallamos las relaciones $a + b \geq c$ y $b + c \geq a$: cuando un antidiós situado en la casilla de valor a salta sobre su vecino de la casilla de valor b para llegar a la casilla de valor c, el valor de este grupo de tres casillas pasa de $a + b$ a c, y el valor del resto del damero no cambia; la conclusión es idéntica si el antidiós de la casilla de valor c salta sobre una vecino en la casilla de valor b hasta la casilla vacía de valor a.

"Se observará inmediatamente que el valor de la posición inicial es 4: para cada brazo de la cruz, la suma de los valores es igual a 1 y en el cuadrado central solamente están ocupadas las celdillas de valor nulo. Por otra parte, la posición final corresponde a una suma igual a 6, superior al valor de la posición inicial. Como ningún movimiento permite aumentar el valor total, ninguna secuencia de movimientos puede hacerlo pasar de 4 a 6: el problema carece de solución."

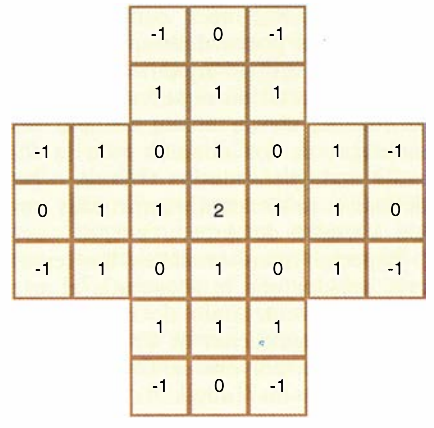
Abel y Roque reflexionaron un momento.

"Muy perspicaz", concedieron.

"Cuatro numerosofistas célebres, de potencia intelectual inimaginable, gigantes de nuestra profesión, han descubierto una función Pagoda aplicable al ejército del Gran Cric. Se llaman Elwyn, del clan Berlekamp, John Horton, del clan Conway, Richard, del clan Guy, y Mike, del clan Boardman. Su solución recurre al número áureo, φ, que vale $(\sqrt{5} - 1)/2$, o sea, aproximadamente, 0,61803398... Este número tiene gran importancia numerosófica por una multitud de razones.



7. Un rompecabezas del juego de los antidioses



8. Esta función Pagoda demuestra que el problema carece de solución

En lo tocante al ejército del Gran Cric, la propiedad crucial es la igualdad taumatúrgica $\varphi^2 + \varphi = 1$.

"La función Pagoda de cuatro cofrades se muestra en la figura 8. Supongamos que un antidiós pueda ser enviado a cinco casillas de distancia y asignemos a tal casilla el valor 1. Asignemos a las demás casillas potencias adecuadas de φ. Merced a la igualdad taumatúrgica podemos demostrar que este damero es realmente una función Pagoda.

"Toda configuración del ejército en la cual la casilla de valor 1 estuviera ocupada por un antidiós es por lo menos igual a 1. Por otra parte, el valor del conjunto de casillas situadas detrás de la Gran Muralla se calcula algebraicamente mediante diversas series geométricas. Sabemos que $1 + \varphi + \varphi^2 + \varphi^3...$ es igual a $1/(1 - \varphi)$, pues $0 < \varphi < 1$; se deduce que $\varphi^2 + \varphi^3 + \varphi^4 + \varphi^5...$ es igual a $\varphi^2/(1 - \varphi)$, o sea, igual a 1, debido a la igualdad taumatúrgica. Si multiplicamos por φ^{n-2}, resulta que, para todo n mayor o igual que 2:

$$\varphi^n + \varphi^{n+1} + \varphi^{n+2} + \varphi^{n+3} + ... = \varphi^{n-2}$$

"Podemos así acceder al valor de la primera línea:

$$(\varphi^5 + \varphi^6 + \varphi^7 + \varphi^8 + ...) + (\varphi^5 + \varphi^6 + \varphi^7 + \varphi^8 + \varphi^9 + ...) = \varphi^3 + \varphi^4 = \varphi^2(\varphi + \varphi^2) = \varphi^2$$

"El valor de la segunda línea se obtiene multiplicando por φ, lo que da φ^3; la tercera línea es igual a φ^4, y así sucesivamente. El valor del conjunto de casillas situadas tras el muro es por consiguiente igual a:

$$\varphi^2 + \varphi^3 + \varphi^4 + \varphi^5... = 1$$

"Por último, como cada casilla de este lado del muro posee un valor positivo no nulo, todo ejército finito acantonado tras el muro tendrá un valor menor que 1. Por tanto, ninguna sucesión de movimientos puede llevar este valor a 1 o mayor; lo impide el envío del antidiós a cinco casillas del muro. En resumen: el Gran Cric no podrá jamás recuperar más que una ínfima parte de lo que ha perdido."

"Sorprendente", opinó Abel.

"Tranquilizante", añadió Roque. "Pero esta historia de la loseta infinita me interesa mucho: podríamos librarnos de un montón de piedras incluyendo una loseta infinita en cada ejemplar del juego de los antidioses."

"Una idea lucrativa", aplaudió Abel.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

WINNING WAYS. Elwyn R. Berlekamp, John H. Conway y Richard K. Guy, volumen 2, Academic Press, 1982.

Libros

Antonio Domínguez Ortiz, Angel Romo, Luis Alonso y Luis Cornudella

Quinto centenario

Decantación granadina

El reino de Granada y el nuevo mundo, por VV. AA. Actas del V Congreso Internacional de Historia de América. Granada, 1994.

No del todo aquietadas aún las turbulencias y remolinos suscitados por la conmemoración de los acontecimientos del año 1492, los más decisivos de la historia de España, siguen todavía viendo la luz numerosas publicaciones relacionadas con ellos, especialmente con el descubrimiento de América y sus consecuencias. El contraste entre las que aparecieron, al hilo de la novedad, en los medios de comunicación más difundidos y las que ahora, con el retraso impuesto por su propia índole, van apareciendo, es notorio: en aquéllas predomina el sensacionalismo y, con bastante frecuencia, el apasionamiento, mientras que éstas, obra de profesionales, tienen la solidez del trabajo bien hecho y, sin perjuicio de opciones personales diversas, se mantienen en un nivel de serenidad e imparcialidad muy encomiable.

A este segundo género pertenecen las Actas que ahora ven la luz gracias al patrocinio de la Diputación de Granada, ciudad que casi acaparó el protagonismo de los acontecimientos de aquel año memorable, pues comenzó con la entrada solemne de los Reyes Católicos en el último reducto del Islam español, en el vecino campamento de Santa Fe se firmaron las capitulaciones con Colón y, también allí, se firmó el decreto de expulsión de los judíos, hechos todos relacionados entre sí, como se ha puesto muchas veces de relieve. Después, imperativos geográficos y económicos hicieron que las relaciones entre España y América se concentraran en la Baja Andalucía, especialmente en el eje Sevilla-Cádiz; mas no por ello quedó al margen el Reino de Granada, que participó activamente, aunque con grandes diferencias entre sus comarcas; fueron muy activas las relaciones en Málaga, puerto de etapa y punto de abastecimiento de ciertos productos para las flotas y galeones: pólvora, bizcocho... Casi nulas, en cambio, en Almería, no sólo por la lejanía, sino porque, tras las guerras y expulsiones de los moriscos, la ciudad y la actual provincia quedaron en casi total despoblación y ruina. Granada ocupó una situación intermedia.

Las relaciones revistieron formas muy diversas, reflejadas en la agrupación que los directores del Congreso han hecho de las 125 comunicaciones que recogen las Actas. Unas son de tipo ideológico e institucional; hay similitudes notorias y precedentes clarísimos, como es la extensión a las Indias del régimen de Patronato eclesiástico que los reyes hispánicos obtuvieron de la Santa Sede y que (caso único en la Cristiandad) les confería un poder absoluto en cuanto al régimen temporal de la Iglesia. Las razones esgrimidas para tan extraordinaria concesión eran las mismas en uno y otro caso: los esfuerzos realizados para evangelizar los países conquistados, aunque los medios y los resultados fueran tan distintos.

Otro bloque de comunicaciones se refiere a la emigración de granadinos a Indias: unos como descubridores y conquistadores, otros como simples colonos, no pocos desempeñando altas tareas en la organización eclesiástica y civil en aquellos inmensos territorios; sirvan como ejemplo las empresas de los miembros de la familia malagueña de los Gálvez, o las delicadas misiones desempeñadas por los Vázquez de Arce.

Especial interés revisten los temas relacionados con la economía, el arte y la cultura; a título de ejemplo citaré la comunicación de Emelina Martín sobre la pólvora de Granada y la defensa de las Indias, la de Julián B. Rivera acerca de "Granadinos en la sede del monopolio comercial gaditano", o la de Cristina Esteban, "Plateros granadinos en Indias". Hay que añadir que el tema del Congreso ha sido interpretado con gran laxitud; hay bastantes trabajos cuya relación con Granada es muy remota, pero ello no quita, más bien añade, interés al conjunto que, tomado globalmente, representa una aportación considerable a una esfera de conocimientos que, por su amplitud, es prácticamente inagotable. Dentro de la masa de estudios puntuales se incluyen algunos estudios comparativos de más amplio radio: tal, el de Beatriz Suñé sobre los moriscos de Granada y los indios de Yucatán, o el trabajo de Lourdes Díaz Trechuelo que, con su vasta preparación acerca del fenómeno migratorio a Indias, analiza la extensión y repercusiones de la emigración granadina.

Interesa también hacer constar que, aunque estos tres densos volúmenes han sido escritos por y para especialistas en historia de América, pueden ser de amena y provechosa lectura para toda persona culta. (A. D.)

Taxonomía vegetal

Cuestión de nombres

A list of Linnean generic names and their types, dirigido por W. Greuter. Koeltz Scientific Books, Königstein, 1993.

Names in current use in the families Trichocomaceae, Cladoniaceae, Pinaceae and Lemnaceae, dirigido por W. Greuter. Koeltz Scientific Books, 1993.

Names in current use for extant plant genera, dirigido por W. Greuter, R. K. Brummitt, E. Farr, N. Kilian, P. M. Kirk y P. C. Silva. Koeltz Scientific Books, 1993.

Vascular plant families and genera, por R. K. Brummitt. Royal Botanic Gardens, Kew, 1992.

Desde siempre, los taxonomistas han prestado mayor atención a la creación de nuevos nombres y la descripción de nuevos taxones que a la elaboración de obras de síntesis. En los últimos decenios se progresó de forma espectacular en los estudios de inventario del patrimonio natural de plantas silvestres, especialmente en las floras tropicales y mediterráneas.

Pronto se vio la necesidad de establecer pautas para denominar las plantas. Así nació el Código Internacional de Nomenclatura Botánica. Se impusieron nombres válidos, los que deben cumplir determinados requisitos, y nombres inalterables, o "nomina conservanda". Periódica-



Drosophyllum lusitanicum, *planta insectívora, endémica del sur de la península Ibérica y de la península Tingitana*

mente, sin embargo, se han venido revisando los nombres al descubrirse descripciones más antiguas.

Ante ese caos relativo, con cambios continuos de nombres de amplia difusión, surgió un proyecto y la serie de libros que encabeza la reseña. Los tres primeros son el resultado parcial de un plan ambicioso ideado por la Asociación Internacional de Taxonomía Vegetal, que pretende recopilar y conservar todos los nombres en uso de las diferentes jerarquías taxonómicas. Se desechan los nombres que, sin negarles validez original, han caído en desuso.

La gestación de esta obra no ha estado libre de polémica. ¿A quién correspondía decidir la inclusión de un nombre y qué criterios debían emplearse para la exclusión de otros? No era fácil convenir en el uso correcto o generalizado, cuando existen diferentes escuelas de taxónomos con criterios dispares.

Para salir al paso de las críticas, editores e impulsores del proyecto justifican su empresa. Ponderan el enorme ahorro de tiempo y de trabajo para los taxónomos, que evitarán eternizarse así en exasperantes búsquedas bibliográficas. Los tres prólogos merecen ser leídos con atención, pues traslucen las dificultades de la controversia subyacente. Al final se recopilan los nombres incluidos, pero no se cierran las puertas a la sinonimización de los mismos.

Se indican los nombres de las familias, su autor y lugar de publicación, si es un nombre a conservar, el género tipo y si tiene algún sinónimo. Se recopilan las familias descritas desde Antoine Laurent de Jussieu en la obra *Genera Plantarum* del año 1789 hasta el año 1970. En la relación de familias ha existido cierta manga ancha. Se acepta para una misma familia más de un nombre: las Asteraceae, nombre de acuerdo con el código por derivar del género *Aster*, tiene tanta validez como Compositae, nombre ampliamente difundido y utilizado. La laxitud incluye algún desliz, caso de la familia Drosophyllaceae descrito el año 1989, con el género tipo *Drosophyllum*, incluido tradicionalmente en Droseraceae. Para más escarnio, este género *Drosophyllum* en el volumen tercero se incluye entre las Droseraceae.

Aunque la delimitación de familias en las plantas no es un tema cerrado, sí es discutible la fragmentación de algunas, que en determinados casos raya la pulverización en familias monogenéricas; para muestra, las Quenopodaciáceas, aquí escindidas en Salsolaceae y Chenopodiaceae.

Para cada especie se indica el nombre latino, autores, lugar de publicación, basiónimo, si es que existe, y el tipo. Sus autores son especialistas de las familias estudiadas y en ellas se da un tratamiento abierto de los géneros conflictivos y de las especies poco conocidas. En estos últimos casos se recopilan todos los nombres y se da el taxón con diferentes categorías taxonómicas, dejando el tema abierto a posteriores investigaciones.

¿Qué sucede con los nombres que no se incluyen en el libro? Se supone que se han rechazado. Pero, ¿no han sido aceptados porque su publicación no reúne las condiciones de validez? ¿Se han rechazado porque son quizá sinónimos? En el segundo caso se hubiera debido indicar en qué género se incluyen.

Este vacío se subsana en la cuarta obra de la reseña, sobre los nombres de géneros y familias. Obra sintética y muy pragmática donde, dejando de lado códigos y normativas, se relacionan todos los géneros, sus sinónimos y la familia a que pertenecen. El libro incluye al final una relación de familias y los géneros que abarcan. La nomenclatura tiene por finalidad la designación correcta de los seres vivos, pero no es ninguna ciencia por sí misma. Quizá por ello se hace ahora más necesario que nunca un acuerdo normativo que confiera estabilidad a los nombres de los organismos. Con todas sus limitaciones, los libros mencionados dan un paso importante en este sentido. (A. R.)

Ciencia británica

Victoriana

RICHARD OWEN: THE HUNTERIAN LECTURES IN COMPARATIVE ANATOMY. MAY AND JUNE 1837. Introducción y comentarios de Phillip R. Sloan. The University of Chicago Press; 1992. **RICHARD OWEN. VICTORIAN NATURALIST**, por Nicolaas A. Rupke; Yale University Press; New Haven, 1994.

VESTIGES OF THE NATURAL HISTORY OF CREATION AND OTHER EVOLUTIONARY WRITINGS, por Robert Chambers. Introducción de James A. Secord; The University of Chicago Press; Chicago, 1994.

CHARLES DARWIN'S MARGINALIA. Preparados por Mario A. Di Gregorio, con la colaboración de N. W. Gill. Garland Publishing, Inc.; Nueva York, 1990. **THE CORRESPONDENCE OF CHARLES DARWIN.** Volumen 9. Dirigido por Frederick Burkhardt, Duncan M. Porter, Joy Harvey y Marsha Richmond. Cambridge University Press; Cambridge, 1994.

No debe confundirse ciencia victoriana con darwinismo. Esa es la tesis que se viene asentando desde hace unos quince años con la recuperación de la figura central del XIX británico, denostada por la voluntad de Darwin y su círculo, reforzado su olvido con el éxito de la teoría sobre la evolución de las especies a través del mecanismo de selección natural. Nos referimos a Richard Owen (1804-1892), cuya etapa juvenil recupera Phillip Reid Sloan en *Richard*

Owen: The Hunterian Lectures in Comparative Anatomy. May and June 1837. Por su lado, Nicolaas A. Rupke ha elaborado la historia más rigurosa hasta el momento sobre su vida y extensísima obra en *Richard Owen. Victorian Naturalist.*

París marcaba en los años liminares del siglo el rumbo de la biología. Joseph Henry Green introducía sus conferencias con dos diagramas esquemáticos; uno, estático, de inspiración cuveriana, presentaba los cuatro *embranchements* (vertebrados, articulados, moluscos y radiados), y otro, "lamarckista", que ordenaba los organismos en series ascendentes y ramificantes. Owen, que asistió a las del curso 1827-28, anotó sus impresiones sobre el carácter ramificante de la naturaleza. Al poco, él hubo de afrontar el problema capital de la anatomía comparada, el de la unidad de tipo, motivo en los años treinta de un famoso debate entre Georges Cuvier y Etienne Geoffroy Saint Hilaire. En su visita al *Cabinet d'anatomie comparée* del Museo de París, en 1831, comprobó el funcionalismo allí dominante: cada especie constituía una entidad autónoma y los especímenes se disponían de suerte tal, que cada animal aparecía en un número mayor o menor de preparaciones en sus sistemas muscular, digestivo, circulatorio, respiratorio, nervioso y reproductor, dentro de un orden descendente de los vertebrados a los radiados.

En 1832 comienza sus investigaciones sobre marsupiales y monotremas. Publica la *Memoir on the Pearly Nautilus*, donde revela la anatomía interna y relaciones taxonómicas de ese cefalópodo pelágico, trabajo que le granjeó el aprecio de los biólogos continentales, en particular de Alemania. De 1833 a 1840 va apareciendo el *Descriptive and Illustrated Catalogue of the Physiological Series.* Da sus primeras conferencias sobre el reino animal y describe *Trichina spiralis*, el parásito que causa la triquinosis.

A su vuelta a Inglaterra en 1836, Darwin entra en contacto con Owen, quien se encarga del estudio de *Toxodon* y otros fósiles de América del Sur traídos en el *Beagle*. Al año siguiente, dicta el curso cuyas siete primeras sesiones aparecen ahora en *The Hunterian Lectures in Comparative Anatomy*. Sloan se ha propuesto ahondar en los supuestos biológicos del conferenciante y rastrear los orígenes del transformismo darwinista. El contenido del curso arranca con una introducción histórica de la anatomía comparada, para exponer luego los sistemas y examinar por fin problemas teóricos de largo alcance: principio vital, teoría de la recapitulación, forma y función, unidad de tipo, leyes embrionarias y de correlación de las partes, relaciones, químicas incluidas, entre el mundo vegetal y animal, y otros más. Leyendo entre líneas, percibimos que, en el intervalo transcurrido de octubre de 1836 a julio de 1837, estaba produciéndose una convergencia de intereses entre Darwin y Owen.

Owen cambiará en cursos posteriores el enfoque centrado en los sistemas de órganos. Salta de los "órganos" a la "organización" y, por ende, desde la "función" a la "forma" o *Bauplan*. Sustitución teórica cuya versión práctica realiza mediante su habilidad reconstructora de especies extinguidas. Así, con el moa. La reconstrucción de esta ave corredora se inicia con la investigación de un hueso que se suponía de buey. Owen rearmó, a partir del fémur, la figura y la incluyó entre los parientes del avestruz. Hizo lo propio con el megaterio —la labor magistral de nuestro Juan Bautista Bru— a partir de un esqueleto incompleto cedido por el cónsul británico en Buenos Aires, más fragmentos traídos por Darwin y otro ejemplar posterior.

El nuevo enfoque, de la "función" a la "forma", simbolizaba la emancipación de la anatomía comparada. Con esta aproximación va desgranando las *Lectures on the Comparative Anatomy and Physiology of the Invertebrate Animals*, que no alcanzaron la calidad de la *Odontography: or a Treatise on the Comparative Anatomy of the Teeth.* (Owen, primer presidente de la Sociedad Microscópica, intuyó la importancia de ese útil para la investigación paleontológica de los dientes.) Por encima de todo fue una autoridad en morfología de vertebrados (*Lectures on the Comparative Anatomy and Physiology of the Vertebrate Animals, Anatomy of Vertebrates* y otros).

Estableció el orden de los dinosaurios. Al pintarlos con rasgos mamiferoides, señalaba, implícitamente, que los reptiles modernos eran menos adelantados que sus predecesores fósiles, refutando de paso cualquier cadena simple de transmutación progresiva.

A la par que la estratigrafía iba desenterrando la sucesión de niveles, se comprobaba que los fósiles no se distribuían al azar, sino que seguían un orden progresivo, de lo más elemental, en estratos inferiores, a lo más complejo en lechos superiores. La idea de desarrollo progresivo recibió un sólido respaldo con la aparición de los *Ossemens fossiles*, donde Cuvier llamaba la atención sobre la presencia de las clases superiores de cuadrúpedos en los estratos geológicos recientes. La tardía aparición de mamíferos y la ausencia de fósiles humanos se consideró la sustanciación de una progresiva distribución de la vida a través del tiempo. El "desarrollo progresivo" vino a entenderse en tres sentidos fundamentales. En el primer modelo, el taxonómico, el progreso designa la secuencia de complejidad de formas a través del tiempo.

En el segundo modelo, el desarrollo progresivo se combinó con la teoría del calor central. La Tierra —creíase— habíase originado como una bola de fuego; procedió luego a través de un enfriamiento gradual, asociado con otros cambios físicos de clima, composición atmosférica, distribución del mar y la tierra, etc. La fauna y la flora de cada período sucesivo se ajustaban a las condiciones físicas del momento. La naturaleza progresiva de la sucesión fósil fue una secuela de la adaptación al desarrollo físico del globo. El tipo dominante de vida durante un período particular de la historia de la Tierra había sido el más ajustado a las condiciones ambientales del momento, lo que habría provocado que el registro fósil ascendiera de formas sencillas a complicadas, ya que los organismos primitivos habíanse desenvuelto mejor en las condiciones primitivas; la vida más avanzada floreció cuando el entorno adquirió unas condiciones más templadas. En el tercer modelo de distribución estratigráfica de los fósiles, se negaba la realidad del desarrollo progresivo y cualquier prueba en favor de la misma se reputaba artefacto de la muestra o resultado de la imperfección de los datos.

Owen pasó de la teoría del calor central a la adopción del enfoque transcendentalista de la paleontología del primer método. Aplicando la ley embriológica de von Baer a la sucesión de fósiles, demostró que el progreso podía definirse como un patrón radiativo, de lo genérico a lo específico. Las fases embrionarias que atraviesan los animales superiores semejan los estados adultos de los miembros extintos de su propia clase. Por consiguiente, las formas extintas representan las estructuras más generales, mientras que las formas actuales muestran las formas más específicas. En las aves, los embriones de las especies actuales tienen separadas las vértebras terminales que gradualmente se van fundiendo; pero, como el descubrimiento del *Archaeopterix* iba a demostrar, las aves del mesozoico retuvieron en el estado adulto una serie de vértebras.

Una organización superior o más



Richard Owen con el fémur de moa

adelantada es la que parte del tipo general: "Se produce un avance en la organización a medida que nos vamos alejando del arquetipo." El esqueleto vertebrado podía considerarse como una serie de vértebras ideales, más exactamente "una serie de segmentos que se suceden unos a otros a lo largo del eje del cuerpo". Para Owen, la unidad de tipo constituía una indicación de relación genética y era prueba, por tanto, de la descendencia y evolución orgánica; Darwin dio un paso más y vinculó la unidad de plan con el proceso de selección natural.

En pleno proceso de conversión de Owen a la anatomía transcendental aparecen los *Vestiges of the Natural History of Creation*, que desencadenaron una de las grandes controversias en las que fue fértil el siglo XIX. Publicados anónimamente en 1844 por Robert Chambers, los *Vestiges* y su continuación, las *Explanations*, compendian cuanto se sabía o disputaba en torno a la formación del universo, el registro de la vida, la transformación de las especies, el origen y destino de los seres humanos. Muchas doctrinas de los *Vestiges* se desvanecerían, antes de doblar el siglo, ridiculizadas; pensemos, por ejemplo, en la defensa de la frenología y la aceptación de la creación de insectos a través de la electricidad.

Chambers parte de la astronomía y la geología para apoyar su idea del progreso, entendido como cambio gradual, cuya prolongación en la vida ordinaria se revelaba en la economía política liberal y la reforma de la clase media. Es la naturaleza entera la que experimenta un proceso de avance incesante. El firmamento nos habla de un proceso de condensación desde la bola de fuego originaria hasta la formación de nebulosas, sistemas solares, planetas; los estratos despliegan una historia progresiva de organismos crecientemente complejos. La sociedad obedece a ese patrón progresivo de civilización e inteligencia. Hasta las razas surgieron una después de otra.

El mecanismo de transmutación de las especies lo funda *Vestiges* en el comportamiento embrionario. Leves demoras en la gestación significa que un tipo inferior podría, llegada la ocasión, originar un tipo superior. Chambers trata de dos modelos antagónicos del desarrollo embrionario: el de recapitulación de formas adultas de organismos de complejidad creciente (modelo de Tiedemann y Serres) y el de diferenciación de lo genérico a lo específico (modelo de von Baer); con el tiempo abandonará el primer modelo en favor del segundo.

Chambers no sospechó la reacción adversa de Brewster, Forbes y otros. Particularmente críticos fueron el astrónomo John Herschel y el geólogo Adam Sedgwick, quien negaba que su autor tuviera experiencia directa en el trabajo de campo. A modo de respuesta, en 1845 publicó *Explanations: A Sequel*, donde ofrecía una defensa razonada de la generalización de la ley natural.

Ese es el ambiente que se refleja en los *Marginalia* de Darwin, una fuente imprescindible para conocer e interpretar con justeza el desarrollo de su pensamiento. Recogen las anotaciones manuscritas en los márgenes y páginas de cortesía de los libros, en fichas o en hojas sueltas. Su lectura nos permite descubrir los autores preferidos y la influencia que ejercen en él. Hay señalizaciones cuyo objetivo inmediato es el de recopilación de datos. Muchas veces, el interés utilitarista es inmediato: "Tras la página... no me interesa ni una palabra"; "Esto sólo es válido para la historia antigua de los perros... no creo que me pueda aprovechar". Abundan los juicios de valor: "Excelente resumen del todo, aprueba lo que yo he dicho". Reacciones espontáneas: "Buen chico", "infumable", "divertido", "tan burro como siempre".

No parece que Darwin sintiera la necesidad de disciplina o metodología científica. Confía en su propia claridad de mente para percibir si un autor aporta datos suficientes que respaldan una tesis: "No sé si Lamarck ha producido más beneficio al plantear la cuestión que daño con tan pocos hechos." En esa misma onda de su teoría de la evolución, apostilla el *The Natural System*: "Se interesa por desentrañar las relaciones pero no se esfuerza en fechar la separación", lo que significa que la noción de descendencia con modificación la daba ya por sentada en los años cuarenta. En otras ocasiones se manifiesta con mayor rotundidad: "Es la sucesión, no la semejanza, lo que constituye una especie."

La herencia, variación, adaptación, selección, clasificación, sistemática, lucha por los recursos, especie y otros conceptos a los que él otorgará un sentido propio reciben obviamente la mayor atención. Lee y relee, entre los británicos, a Lyell, Blyth, Yareel, Blacwall, Newman, Newport, Jenyns, Westwood y, por supuesto, Henslow. Se desenvuelve bien en francés, menos en alemán y algo entendía del italiano y el español. Tenía anotadas obras de Cuvier, aunque le merecía mayor crédito Saint Hilaire; crítico con Milne-Edwards, conoce a C. L. Bonaparte. Las notas de los libros alemanes se limitan, por lo común, a traducciones de ciertos pasajes o paráfrasis; en los anaqueles de su biblioteca están bien representados Gärtner, Kölreuter, Ehrenberg, Haeckel.

Leyó y apostilló profusamente los *Vestiges*. Se detiene en los apartados de zoología: "Es monstruosa —le recrimina— la forma de explicar el tránsito de peces a reptiles." De modo muy distinto se comporta con los escritos de Owen. En un comienzo es la de un discente que toma apuntes; acota datos e ideas de anatomía, embriología y clasificación, que piensa aprovechar para sus propios libros. Algunas confesiones son ilustrativas; así, la apostilla al *On the nature of limbs*: "Me adhiero a su idea de que existe un arquetipo creado, el progenitor de la clase." O esta otra a su *Palaeontology*: "La historia de los peces indica mutación más que desarrollo: acertada precisión."

Sabido es el gran aprecio que le mereció el español Félix de Azara. No son infrecuentes las anotaciones a los *Essais sur l'histoire naturelle des quadrupèdes de la province du Paraguay*: tapir, fecha de introducción y crecimiento de los caballos, tasa de crecimiento del ganado, evolución de los cuernos. De los *Voyages dans l'Amérique méridionale* encontramos, entre otras, una nota expresiva: "lucha por la existencia".

La breve acotación marginal se torna desarrollo más extenso en las *Cartas*, otra fuente imprescindible para conocer la génesis y el sentido exacto de la doctrina darwinista. *The Correspondence of Charles Darwin* la viene publicando con aplauso unánime Cambridge University Press. El epistolario ha llegado ya al volumen 9, donde se recogen las cartas enviadas o recibidas en 1861. A esta entrega se le han agregado valiosos apéndices que aclaran diversos aspectos aludidos en las cartas y que, por su importancia, merecen algo más que las anotaciones que explican el contenido de las misivas. Año y pico después del *Origin of Species* Darwin sigue de cerca la recepción del mismo, mientras prepara la tercera edición "con adiciones y correcciones".

Pese a que le cuesta escribir, su correspondencia fue ingente: "Tengo que trabajar duro y con lentitud cada frase." Dominan aquí las epístolas relativas a cuestiones botánicas, aunque repite en más de una ocasión que se siente un aficionado. Asedia literalmente a Joseph Dalton Hooker, de los Jardines de Kew. Le apasionan las orquídeas, tema de varias cartas con otros destinarios, en particular con Lindley. Se le ve batallando con el desarrollo y la función del aparato floral, sobre todo el labelo de las orquídeas. Diserta sobre hibridación y cruzamiento entre variedades, polinización de los insectos; inquiere si un carácter es hereditario o adquirido, conceptos para él complementarios de las nociones owenianas de homología y analogía. Anima al botánico Asa Gray a la republicación de un opúsculo titulado *Natural selection not inconsistent with natural theology*.

Con los discrepantes, no se detiene en el insulto; llama "tonto" a Agassiz; sin piedad para Owen cuando se cartea con Huxley. Se desenvuelve con soltura en aspectos de la zoología que podrían corroborar su tesis: gradación morfológica de los órganos de los animales. Se queja de que los paleontólogos dejen de lado su explicación del mecanismo de la evolución, aunque confía en ganarse el favor de los geólogos jóvenes. Resulta iluminador el alcance epistemológico que otorga a su teoría: "Piense usted (Alexander G. More) en el caso de la luz —la existencia del éter y la existencia de sus ondulaciones son absolutamente hipotéticas o conjeturales; mas, debido a que esta hipótesis explica y agrupa multitud de fenómenos, es ahora universalmente aceptada como una teoría verdadera. Del mismo modo, me parece, la descendencia de especies con modificación a través de la selección natural agrupa y explica bastante bien muchos fenómenos (clasificación, morfología, órganos rudimentarios, embriología, distribución geográfica y sucesión geológica), y *por tanto* creo en su verdad. Sin ese criterio resultarían inexplicables."

Apoyaba los trabajos de Henry Walter Bates sobre los procesos de mímesis de los insectos amazónicos, que Darwin consideraba una confirmación sólida de la eficacia de su teoría de la selección natural. Este cruce de cartas constituye breves

opúsculos sobre la variabilidad geográfica de especies dentro de un mismos género y su origen en la modificación de los órganos de la reproducción y en el dimorfismo sexual; en particular, la extensión de las formas intermedias. (L. A.)

Biotecnología

Fundamentos

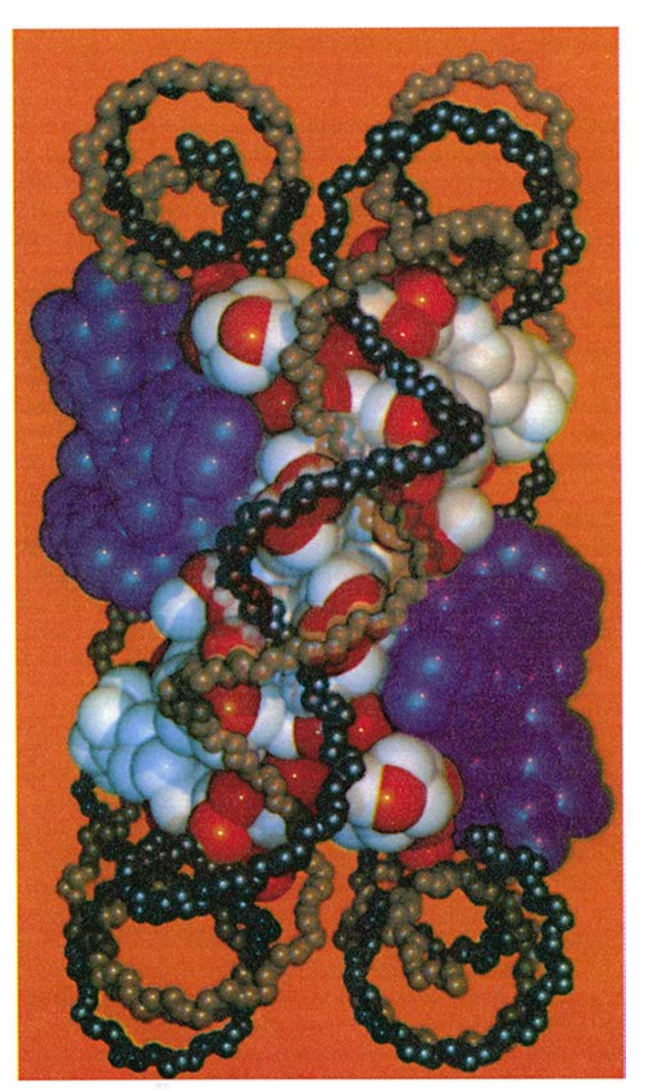
STRUCTURAL BIOLOGY: THE STATE OF THE ART. Dirigido por R. H. Sarma y M. H. Sarma. Adenine Press; Nueva York, 1994.

Apenas dos décadas atrás, en 1972, Paul Berg y Samuel Cohen realizaron con éxito las primeras manipulaciones genéticas en el tubo de ensayo construyendo un híbrido genético viable y capaz de propagarse, al fusionar el genoma vírico del SV40 con el del bacteriófago lambda. Estos experimentos allanaron el camino hacia el acoplamiento entre sí de materiales genéticos —incluso provenientes de distintos reinos— y la propagación de estos elementos recombinados en células, lo mismo animales que bacterianas. Su repercusión y trascendencia han sido tales, que han supuesto el inicio de una nueva revolución que hemos dado en llamar biotecnológica.

Apreciaremos la potencialidad de esta recién adquirida capacidad fijándonos en el hecho de que las inviolables barreras evolutivas que han perdurado a lo largo de millones de años se franquean por vez primera permitiendo el trasiego de genes entre organismos vivos cuyo intercambio genético permanecía vedado, dando lugar a la creación de organismos nuevos, es decir, no existentes en la naturaleza e imposibles de generar por medios naturales.

Las consecuencias de la adquisición de esta facultad nos sitúan en una nueva dimensión de la biología. El diagnóstico y la terapia génicas, la transgenia y la transfertilización han dejado de ser entelequias para convertirse en realidades cotidianas. La producción masiva de fármacos, hasta hace poco inaplicables por su escasez, se ha convertido en asequible merced al concurso de modestos microorganismos genéticamente manipulados y condicionados a secretar estas escasas substancias en gran escala.

Pues bien, todo este cúmulo biotecnológico no es gratuito, sino que se asienta sobre el fulgurante progreso experimentado por el conocimiento de la reactividad química de las moléculas biológicas. Hay que tener presente que el propio material genético de cualquier organismo no es otra cosa que una monótona molécula de polímero. Asimismo, el desciframiento de los mecanismos de interacción entre las moléculas químicas no habría sido factible de no haber mediado simultáneamente un profundo y decisivo avance en el análisis y elucidación de su organización estructural. Nunca como ahora el binomio estructura-función ha sido tan determinante. No es posible elucidar la función de las moléculas sin haber antes resuelto su naturaleza y el código de su lenguaje estructural.



ADN nucleosómico en torno a un octámero de histona

El comentario precedente viene al hilo del libro objeto de esta reseña. Los dos volúmenes de que consta recogen las contribuciones efectuadas en la octava y última edición de la reunión internacional conocida como "Tertulias sobre la disciplina de la estereodinámica biomolecular", que tuvo lugar en la capital del estado de Nueva York, en junio de 1993.

La preponderancia del interés por los aspectos estructurales del material genético es palpable, vista la elevada proporción de artículos dedicados al estudio de las conformaciones del ADN. Más de dos terceras partes de la obra versan sobre la estructura del ADN: treinta de entre un total de 48 artículos. La mayoría de ellos aportan nueva y decisiva información sobre esenciales aspectos estructurales. Los resultados que se describen han sido obtenidos de forma casi sistemática a partir de la utilización de novedosas metodologías físicas de un poder de resolución inimaginable hasta hace poco. Así, las estrategias cristalográficas de rayos X se conjugan con técnicas como la espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier, la criomicroscopía electrónica o la resonancia magnética nuclear, todas ellas proporcionando por primera vez información sobre el modo de interacción de las moléculas a nivel tridimensional.

La impresión que produce la lectura de los dos volúmenes se puede resumir en dos elementos concretos. De una parte, la noción de la dinámica estructural y, por otra, la complejidad conformacional de la misma. La creencia común es la de asociar el concepto de estructuración con características de rigidez e inmovilidad. La realidad parece ser muy distinta. El ADN posee capacidad para adoptar configuraciones cambiantes según los requerimientos funcionales del momento, es decir, su organización estructural es dinámica. Más todavía, las moléculas biológicas al interaccionar no responden a parámetros estructurales inamovibles, sino que una misma interacción bimolecular puede adoptar conformaciones diversas, incluso dispares. (L. C.)

Apuntes

La vida sedentaria es mala... hasta para pensar. Según parece, la capacidad mental de los ancianos que desarrollan alguna actividad física se conserva mejor que la de sus coetáneos sedentarios. Se sabía que el ejercicio influye en los sistemas neurotransmisores. Ahora, con experimentos en ratas, disponemos de una prueba contrastable de que la actividad física promueve la expresión génica de un factor de crecimiento en el hipocampo.

Para adentrarse en la historia de los primeros minutos de existencia del universo e imaginar los procesos de nucleosíntesis que se estaban entonces desarrollando, los cosmólogos parten de las concentraciones actuales de deuterio, helio y litio. Pero los modelos deben someterse a los datos ofrecidos por las observaciones reales. Ese ajuste, se aduce hoy, no será cabal si no se acepta que cierta parte de la materia obscura está constituida por partículas elementales formadas en momentos anteriores.

Sigamos con la cosmoquímica. Los modelos de nucleosíntesis de elementos ligeros no han logrado hasta el momento dar una explicación convincente de la concentración de litio-7 y boro-11 en el sistema solar. Para superar esa dificultad, los astrónomos comienzan a ver con buenos ojos el exceso de rayos gamma emitidos por la región formadora de estrellas de la nebulosa de Orión. Esa radiación procede de núcleos de carbono y núcleos de oxígeno excitados en choques con el gas circundante. Todo apunta a que la colisión de esos elementos con hidrógeno y helio produce la inexplicada abundancia de litio, berilio y boro en nuestro mundo inmediato.

¿Natural o congelado? No se trata de ningún alimento. De un estudio comparado sobre embriones de ratón se desprende que los individuos pasados por la crioconservación difieren de los ratones control nacidos sin esa asistencia artificial. No sólo muestran algún que otro carácter morfológico distinto, sino que su conducta diverge también. En particular, las hembras desarrolladas a partir de embriones crioconservados son más torpes.

¿Hubo un mundo de ARN anterior al nuestro de ADN? Parece que sí, y se mueve. La interpretación del código genético corresponde a unas enzimas, las ARN sintetasas, que catalizan la adición covalente de un aminoácido a una molécula de ARN de transferencia. En estas reacciones, primero se activa el aminoácido y luego se acopla a un grupo ribosil-hidroxilo de ARN. Se ha extraído al azar una molécula de ARN que cataliza su propia acilación en presencia de un aminoácido. Aminoacilación que constituye una prueba consistente de la posible existencia del mundo de ARN.

No todo tiempo pasado fue mejor para la diversidad biológica. La zooarqueología ha desenterrado un ayer muy duro. Casi todas las islas de Melanesia, Micronesia y Polinesia fueron habitadas por pueblos prehistóricos. Con la llegada del hombre se clarearon los bosques, se sembraron los campos y se domesticaron animales. También se cazaron las aves, que habían proliferado y diversificado en ausencia de mamíferos predadores. La persecución llegó hasta la exterminación absoluta de más de 2000 especies de aves marinas y terrestres.

Otras veces, las más, las agresiones no tienen un componente antropogénico. El zooplancton desempeña un papel importante en el ciclo biológico del carbono y de otros elementos. Los registros que se vienen realizando desde hace más de cuarenta años en las costas meridionales de California nos revelan que la biomasa del zooplancton ha caído en un 80 por ciento, a medida que ha ido subiendo la temperatura superficial del mar en más de un grado y medio. Los cambios reflejan una creciente estratificación de la columna de agua que ha reducido, a la postre, la aportación de nutrientes esenciales.

Podrían obtenerse altísimas densidades en los dispositivos magnéticos de registro si se consiguiera achicar el tamaño de los granos magnéticos que almacenan los datos. En esa vía se está. Mediante un proceso de sonicación, y a partir de soluciones básicas de cobalto iónico e hidracina, se han sintetizado nanoagregados de cobalto altamente isotrópico. Estas micropartículas o discos, que miden 100 nanómetros de ancho por 15 de espesor, son ferromagnéticos, y la microscopía de Lorentz ha demostrado que constituyen monodominios magnéticos.